



SCET
TUNISIE

**CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN
PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE
YAOUNDE – DOUALA AU CAMEROUN**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : Génie Civil et Hydraulique

Présenté et soutenu publiquement par

Jean NGUENANG NGASSA

Travaux dirigés par :

Dr Adamah MESSAN
Enseignant Chercheur au 2iE
Chef du Laboratoire Eco-Matériaux de
Construction

Mr Oueslati SADOK
Ingénieur Expert Ouvrages d'Art
Autoroute Yaoundé-Douala

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr David Latifou BELLO

Membres et correcteurs : Dr Adamah MESSAN
Mr Moussa LO

Promotion [2015/2016]

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à :

- Mr FENDRI Mohamed Naceur, Directeur Régional Afrique Centrale de la Société Centrale pour l'Équipement du Territoire – Tunisie (Scet-Tunisie) pour m'avoir accepté comme stagiaire au sein de la structure ;
- Mr Jalel SAHLI, Chef de Mission de la Maitrise d'œuvre des travaux de construction de l'autoroute Yaoundé-Douala (Phase 1) pour son accueil ;
- Mr Oueslati SADOK, Ingénieur Expert en Ouvrages d'Art de la Maitrise d'œuvre dudit chantier, pour son encadrement, ses conseils et sa confiance tout au long de ma période de stage ;
- Tous les autres membres de l'équipe de la mission de maitrise d'œuvre qui ont contribué à rendre cette période de stage agréable ;
- Dr Adamah MESSAN, enseignant-chercheur et chef du Laboratoire Eco-matériaux de construction du Centre Commun de Recherche Energie et Habitat Durable du 2IE (Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement) pour son encadrement et ses conseils tout au long de la rédaction de ce mémoire ;
- Toute la famille NGASSA pour le soutien moral, matériel et financier tout au long de ma formation ;
- Tous mes proches qui n'ont jamais cessé de croire en moi et de m'encourager pendant ces années de formation ;
- Tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur contribution à la réussite de ma formation de quelque manière que ce soit.

RESUME

L'objet de notre étude s'inscrit dans le cadre de la concrétisation de la politique des grandes réalisations définie par Son Excellence Paul BIYA chef de l'Etat du Cameroun. C'est dans ce sens que monsieur le ministre des travaux publics a sur hautes directives du premier ministre chef du gouvernement, signé avec la China Communication Construction Company Ltd (CCCC) un mémorandum qui a abouti à la signature d'un accord de prêt d'un montant de 241.4 milliard de Francs CFA entre l'Etat du Cameroun et la EXIMBAK-CHINA pour la réalisation du projet de construction d'une autoroute entre Yaoundé et Douala. La première phase de construction de cette autoroute est ainsi financée à 85% par EXIMBANK-CHINA et à 15% pour l'Etat Camerounais pour un montant total TTC de 388 670 000 000 F CFA et concerne la réalisation des études sur un linéaire de 100 Km et la réalisation des travaux sur un linéaire de 68.3 Km et 25 Km de voie de rétablissement.

Le présent mémoire de fin d'étude traite de la conception et du dimensionnement d'un passage supérieur permettant le franchissement de l'autoroute Yaoundé-Douala au PK1+956. La recherche d'une solution optimale tant sur le plan technico-économique qu'architecturale pour le franchissement de cette autoroute nous a conduit grâce à une analyse multicritère des différentes variantes définies par la SETRA à retenir, en raison de son domaine d'application bien adapté au franchissement des voies autoroutières, la variante pont dalle armée (PSI-DA). Cet ouvrage de 68.2 m de longueur totale à quatre travées (14m, 19.6m, 19.6m, 14m), est constitué d'un tablier continu de 10.64m de large, reposant sur cinq appuis simples et transmettant les efforts au sol grâce à un système de fondation profonde. La structure de l'ouvrage a été entièrement modélisée et calculée à l'aide du logiciel Robot Structural Analysis (RSA) conformément aux prescriptions du BAEL 91 révisé 99.

Le coût de l'ouvrage est estimé à 670 000 000 F CFA TTC et le délai de réalisation de l'ouvrage est d'environ 10 mois.

Mots Clés :

- Mémorandum
- Autoroute
- Passage supérieur
- Conception
- Dimensionnement

ABSTRACT

The purpose of our study is part of the realization of the policy of the great achievements defined by His Excellency Paul BIYA Head of State of Cameroon. It is in this sense that Minister of Public Works on high directives of the Prime Minister Head of Government, signed with China Communications Construction Company Ltd. (CCCC) a memorandum which led to the signing of a loan agreement amounting to 241.4 billion CFA Francs between the State of Cameroon and EXIMBANK-CHINA for the realization of the project to build a highway between Yaoundé and Douala. The first phase of construction of this highway is funded at 85% by EXIMBANK-CHINA and 15% by the State of Cameroon for a total amount of 388 670 000 000 FCFA TTC and concerns studies over a length of 100 km and carrying out the work over a length of 68.3 km and 25 km of recovering.

This thesis deals with the design and dimensioning of an overpass to cross the highway Yaounde-Douala PK1+956. The search for an optimal solution both economic technical and architectural plan for the crossing of the highway led us through a multi-criteria analysis of the different variants defined by SETRA to keep, because of its scope well adapted to the crossing of highways and its multitude of benefits, the reinforce concrete variant deck slab (PSI-DA). This structure of 68.2 m in total length with four bays (14m, 19.6m, 19.6m, 14m), consists of a continuous deck of 10.64m wide, based on five simple supports and transmitting the forces on the ground with a deep foundation system. The bridge's structure has been completely modeled and calculated using the Robot Structural Analysis software (RSA) according to the BAEL 91 revised 99.

The cost of the project is estimated at about 670 million FCFA TTC and the delay of realization of the bridge is about 10 months.

Key Words :

- Memorandum
- Highway
- Overpass
- Design
- Dimensioning

LISTE DES ABREVIATIONS

2IE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

BA : Béton Armé

BAEL : Béton Armé aux Etats Limites

BRECG : Bureau de Recherche d'Etudes et de Contrôle Géotechnique

CCAP : Cahier des Clauses Administratives Particulières

CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières

DC79 : Instruction technique du SETRA sur les directives communes de 1979 relative au calcul des constructions

ELS : Etat Limite de Service

ELU : Etat Limite Ultime

GC77 : Document pilote du SETRA pour le choix des dispositifs de sécurité

HA : Haute adhérence

HT : Hors Taxe

LABOGENIE : Laboratoire National de Génie Civil

PK : Point Kilométrique

PP73 : Document pilote du SETRA pour le calcul des appuis des ponts

PSIDA : Passage supérieur ou inférieur en dalle armée

RSA : Robot Structural Analysis

SCET-Tunisie : Société Centrale pour l'Equipement du Territoire – Tunisie

SETRA : Service d'Etude Technique des Routes et de leur Aménagements

TTC : Tout Taxe Comprise

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	I
RESUME.....	II
ABSTRACT.....	III
LISTE DES ABREVIATIONS.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	VIII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DU PROJET.....	3
I. CONTEXTE DU PROJET.....	3
II. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU PROJET.....	4
III. OBJECTIFS DU PROJET DE FIN D'ETUDES.....	5
CHAPITRE II : ETUDE D'AVANT PROJET.....	6
I. DONNEES RELATIVES A L'ETUDE DE L'OUVRAGE.....	6
I.1. Données topographiques.....	6
I.2. Données géotechniques.....	7
II. DETERMINATION ET IMPLANTATION DES APPUIS.....	8
III. CHOIX DU TYPE D'OUVRAGE : ANALYSE MULTICRITERE.....	9
III.1. Différents types d'ouvrages pour la gamme de portée.....	9
III.2. Choix d'une solution.....	11
IV. PRE-DIMENSIONNEMENT DE L'OUVRAGE.....	15
IV.1. Le tablier.....	15
IV.2. Les appuis.....	18
IV.3. La fondation.....	27
V. LES EQUIPEMENTS DU PONT.....	29
V.1. Les appareils d'appui.....	29
V.2. Revêtement du tablier.....	30
V.3. Les trottoirs.....	30
V.4. Dispositif de sécurité.....	31

**CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR
L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN**

V.5. <i>Joint de chaussée et de trottoir</i>	32
V.6. <i>Système d'évacuation des eaux</i>	32
V.7. <i>Les corniches</i>	33
V.7. <i>Dalle de transition</i>	33
CHAPITRE III : ETUDE DU PROJET D'EXECUTION	35
I. BASES DE CALCUL	35
I.1. <i>Normes et règlements de calcul</i>	35
I.2. <i>Caractéristiques des matériaux</i>	35
I.3. <i>Logiciels utilisés</i>	36
I.4. <i>Charges de calcul</i>	36
II. ETUDE DU TABLIER DE L'OUVRAGE	37
II.1. <i>Charges de calcul du tablier</i>	37
II.2. <i>Combinaisons d'actions</i>	50
II.3. <i>Vérification du poinçonnement de la dalle</i>	52
II.4. <i>Résultats de l'étude du tablier</i>	52
III. ETUDE DE LA PILE CENTRALE ET DE LA SEMELLE DE LIAISON	54
III.1. <i>Les charges appliquées à la pile</i>	54
III.2. <i>Combinaisons d'actions</i>	55
III.3. <i>Résultats de l'étude de la pile centrale et de la semelle de liaison</i>	56
IV. ETUDE DE LA CULEE DE L'OUVRAGE	57
IV.1. <i>Le corbeau d'appui</i>	58
IV.2. <i>Le mur garde-grève</i>	58
IV.3. <i>Murets-caches</i>	59
IV.4. <i>Mur en retour</i>	59
IV.5. <i>Sommier d'appui</i>	59
V. ETUDE DES FONDATIONS PROFONDES	63
V.1. <i>L'étude de la portance</i>	63
V.2. <i>Le dimensionnement interne</i>	64
VI. ETUDE DE QUELQUES EQUIPEMENTS DE L'OUVRAGE	67
VI.1. <i>La dalle de transition</i>	67
VI.2. <i>Les joints de chaussée et de trottoir</i>	68
VI.3. <i>Les appareils d'appui</i>	69

**CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR
L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN**

CHAPITRE III : DEVIS ESTIMATIF ET PLANNING PREVISIONNEL DES TRAVAUX.....	72
CONCLUSION.....	73
BIBLIOGRAPHIE	75
ANNEXES.....	77
ANNEXE 1 : DEVIS ESTIMATIF ET PLANNING PREVISIONNEL.....	78
ANNEXE 2 : PROFIL EN LONG DE LA VOIE PORTEE – PROFILS EN TRAVERS PK1+940 ET PK1+960	79
ANNEXE 3 : RAPPORT D'ETUDE GEOTECHNIQUE	80
ANNEXE 4 : ETUDE DU TABLIER DE L'OUVRAGE	81
ANNEXE 5 : ETUDE DES APPUIS DE L'OUVRAGE.....	82
ANNEXE 6 : ETUDE DES EQUIPEMENTS DE L'OUVRAGE.....	83
ANNEXE 7 : DOCUMENTS GRAPHIQUES RELATIFS A L'OUVRAGE	84

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques de la voie portée.....	6
Tableau 2: Données relatives à la voie franchie.....	7
Tableau 3: Récapitulatif des avantages et des inconvénients de chaque famille de pont.....	12
Tableau 4: Récapitulatif de la comparaison entre les ponts à poutres et les ponts dalle en béton armé	13
Tableau 5: Description des types de piles	19
Tableau 6: Hauteur des piles	22
Tableau 7: Description des différents types de piles-culées.....	23
Tableau 8: Récapitulatif des caractéristiques de la culée	27
Tableau 9: Caractéristiques des semelles de liaison.....	28
Tableau 10: Charges permanentes à prendre en compte	36
Tableau 11: Coefficients pour le calcul des valeurs caractéristiques des charges permanentes.....	38
Tableau 12: Classes de pont	38
Tableau 13: Valeurs du coefficient a_1	39
Tableau 14: Valeurs de V_0	39
Tableau 15: Valeurs de $A(L)$	40
Tableau 16: Caractéristiques d'un camion B_c	41
Tableau 17: Valeurs du coefficient b_c	42
Tableau 18: Caractéristiques d'un tandem B_t	42
Tableau 19: Valeurs du coefficient B_t	43
Tableau 20: Calcul du poids propre du tablier	44
Tableau 21: Calcul du coefficient de majoration dynamique pour la travée intermédiaire.....	45
Tableau 22: Calcul du coefficient de majoration dynamique pour la travée de rive	45
Tableau 23: Caractéristiques du convoi $M_c 120$	45
Tableau 24: Calcul du coefficient de majoration dynamique du système $M_c 120$	46
Tableau 25: Pondération des charges en fonction des Etats limites	50
Tableau 26: Combinaisons à prendre en compte à l'ELU.....	50
Tableau 27: Combinaisons à prendre en compte à l'ELS	51
Tableau 28: Vérification du poinçonnement de la dalle.....	52
Tableau 29: Valeur des sollicitations dues aux charges sur le tablier	53
Tableau 30: Sections d'armatures théoriques	53
Tableau 31: Charges transmises à la pile par le tablier	55
Tableau 32: Sollicitation maximales dues aux charges appliquées sur le voile de la pile centrale	56
Tableau 33: Résultats du calcul du ferrailage du voile de la pile	56
Tableau 34: Résultats du calcul du ferrailage de la semelle de liaison	57
Tableau 35: Charges transmises à la culée par le tablier	61
Tableau 36: Valeurs des poussées des terres sur la culée.....	61
Tableau 37: Résultats du calcul du ferrailage du sommier d'appui	63
Tableau 38: Sollicitations maximales pour le dimensionnement des pieux	66
Tableau 39: Section minimale d'armature pour les pieux forés.....	66
Tableau 40: Résultats du calcul du ferrailage de la dalle de transition	68
Tableau 41: Caractéristiques des appareils d'appui	70
Tableau 42: Caractéristiques géométriques des bossages	70
Tableau 43: Armatures de frettage des bossages.....	71
Tableau 44: Récapitulatif du devis estimatif de l'ouvrage.....	72

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Plan de situation géographique du projet.....	4
Figure 2: Coupe stratigraphique du sol	8
Figure 3: Ouvrages possibles en béton en fonction de la gamme de portée.....	10
Figure 4: Ouvrages métalliques et mixtes possibles en fonction de la gamme de portée.....	10
Figure 5: Epaisseur d'un pont-dalle en BA à quatre travées.....	16
Figure 6: Forme générale de la dalle	17
Figure 7: Numérotation des appuis.....	18
Figure 8: Formes et types de piles type SETRA	20
Figure 9: Description de la culée.....	24
Figure 10: Culée type SETRA.....	25
Figure 11: Représentation d'un convoi Bc.....	41
Figure 12: Représentation du convoi Bt.....	42
Figure 13: Représentation du système Br.....	43
Figure 14: Représentation du convoi militaire Mc 120.....	46
Figure 15: Diffusion des charges dans la dalle.....	48
Figure 16: Modèle de calcul du tablier.....	53
Figure 17: Modèle de calcul de la pile centrale.....	54
Figure 18: sollicitations au niveau de la semelle de liaison	57
Figure 19: Modèle de calcul de la culée	60
Figure 20: Cartographie des efforts sur le sommier d'appui.....	62
Figure 21: Modèle de calcul des pieux.....	65
Figure 22: Modèle de calcul de la dalle de transition.....	67
Figure 23: Appareil d'appui de type B.....	69

INTRODUCTION

D'une manière générale, la création d'un système de communication routière apparaît comme fondamentale dans la réalisation du développement d'un pays. En Afrique en général et au Cameroun en particulier, le transport terrestre reste le principal moyen d'échanges, de transport des biens et de communication entre les hommes, les villes et même les pays voisins.

La volonté de faire du Cameroun un pays émergent s'affirme résolument à travers les projets structurants, tels que la construction d'une autoroute reliant les deux pôles économiques que constituent les villes de Yaoundé et de Douala.

Toutefois, il est important de noter que la construction d'une route nécessite souvent le franchissement d'obstacles tels que les vallées, les cours d'eau, les montagnes, les chemins de fer ou même d'autres routes.

Le tracé de l'autoroute Yaoundé-Douala croise (coupe) au PK1+956, une route dont la continuité est assurée par l'intermédiaire d'un passage supérieur franchissant l'autoroute. Le travail qui nous incombe consiste donc à effectuer la conception et le dimensionnement du passage supérieur au PK1+956, avec pour objectifs spécifiques :

- D'effectuer une analyse multicritère pour le choix du type d'ouvrage le plus approprié ;
- D'effectuer les études structurales complètes de la variante adoptée ;
- D'élaborer les plans d'exécution des différents éléments de l'ouvrage ;
- D'estimer le coût de l'ouvrage.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons suivi une démarche méthodologique à plusieurs étapes :

- Recueil des données et hypothèses de calcul
- Analyse multicritère pour le choix du type d'ouvrage
- Conception et pré-dimensionnement de l'ouvrage choisi
- Modélisation et calcul de la structure à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis
- Etablissement des différents plans
- Etablissement du devis quantitatif et estimatif, ainsi qu'un planning prévisionnel des travaux.

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

Le présent mémoire qui fait la synthèse de ces études, s'articule autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre intitulé « Présentation générale du projet », nous donne une vue globale du projet, au travers de son contexte et de sa situation géographique. Nous présenterons également dans ce chapitre les objectifs de notre projet de fin d'études.

Dans le second chapitre intitulé « Etude d'avant-projet » nous nous intéresserons au choix du type d'ouvrage le mieux adapté au franchissement de l'obstacle (compte tenu des différentes données recueillies), à la conception et au pré-dimensionnement des différents éléments de l'ouvrage choisi, ainsi qu'aux équipements de ce dernier.

Le troisième chapitre intitulé « Etude du projet d'exécution » portera essentiellement sur les résultats du dimensionnement définitif de l'ensemble des composantes de l'ouvrage.

En fin, le quatrième chapitre intitulé « Devis estimatif de l'ouvrage et planning prévisionnel » s'intéressera à l'évaluation des quantités des matériaux à mettre en œuvre, ainsi qu'au délai de réalisation de l'ouvrage.

CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DU PROJET

Ce chapitre présente d'une part de manière sommaire le projet de construction de l'autoroute Yaoundé-Douala à travers son contexte et sa situation géographique, et d'autre part les objectifs de notre projet de fin d'études.

I. Contexte du projet

Dans sa configuration actuelle, l'axe Yaoundé-Douala, longue de 240 km, constitue une section de la route nationale n°3. Cet axe routier qui a été mis en service en 1984, est l'une des infrastructures routières les plus importantes dans les corridors Douala-Bangui et Douala-N'Djamena. Toutefois, en raison des surcharges élevées, du trafic important de gros porteurs et de la fatigue de la chaussée, cet axe ne respecte plus les exigences d'une infrastructure moderne et présente un très faible niveau de sécurité.

C'est fort de ce constat que le gouvernement de la République du Cameroun envisage de mettre en œuvre un programme autoroutier entre Yaoundé, Douala, Kribi et Bafoussam. C'est ainsi que Monsieur le ministre des travaux publics a, sur hautes directives du premier ministre chef du gouvernement, signé le 07 Juillet 2009 avec la China Communication Construction Company Ltd (CCCC), un mémorandum pour la réalisation du projet de construction d'une autoroute entre Yaoundé et Douala, lequel a abouti le 28 Juin 2012 à la signature d'un accord de prêt d'un montant de 241.4 Milliards de Francs CFA entre l'Etat du Cameroun et EXIMBANK-CHINA.

Selon les termes de ce mémorandum, le MINTP autorise ce groupement d'entreprises Chinoises à réaliser en premier lieu les études techniques pour la construction d'un premier tronçon de 100Km entre Yaoundé et Douala à partir de Yaoundé.

La première phase de construction de cette autoroute consiste en la réalisation des études sur un linéaire de 100 Km, et la réalisation des travaux sur un linéaire de 68.3 Km et 25 Km de voie de rétablissement. Cette phase est ainsi financée à 85% par EXIMBANK-CHINA et à 15% par le gouvernement du Cameroun, pour un montant totale TTC de 338 670 000 000 FCFA, et un délai d'exécution de 60 mois.

Pour accompagner le Maître d'ouvrage, la mission de maîtrise d'œuvre a été attribué, après l'appel d'offres international restreint N° 00121/AOIR/MINMAP/CCMP-TR/2012 du 14 décembre 2012, au groupement SCET TUNISIE/LOUIS BERGER, par le marché N° 000149/M/MINMAP/CCPM-TR/2013 pour un montant de 5 387 036 348 F CFA TTC,

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

financé pour le gouvernement du Cameroun. L'assistance géotechnique à la maîtrise d'ouvrage a quant à elle été confiée au LABOGENIE (Laboratoire National de Génie Civil) par le marché N° 000186/M/MINMAP/CCPM-TR/2015 pour un montant de 1 724 088 043 F CFA TTC financé également par le gouvernement du Cameroun.

II. Situation géographique du projet

Le présent projet de construction de l'autoroute Yaoundé-Douala constitue le premier projet autoroutier du Cameroun. Il débute au Nord-Ouest de la capitale du pays dans le village de Nkol-Nkoumou et prend fin dans la capitale économique Douala au Nord Est de la ville dans le village de Logbessou.

L'itinéraire suit en parallèle l'axe lourd Yaoundé-Douala dans son secteur Nord et croise le plus souvent les axes desservant les unités administratives au Nord de l'axe lourd, notamment :

- Boumnyebel – Botmakak
- Pouma – Sackbayeme
- Edéa – Log badjeck au Nord-Ouest de la ville d'Edéa.

La première phase du projet dans laquelle s'inscrit notre étude prend fin à Bodmon, tel qu'illustré par la figure 1 :

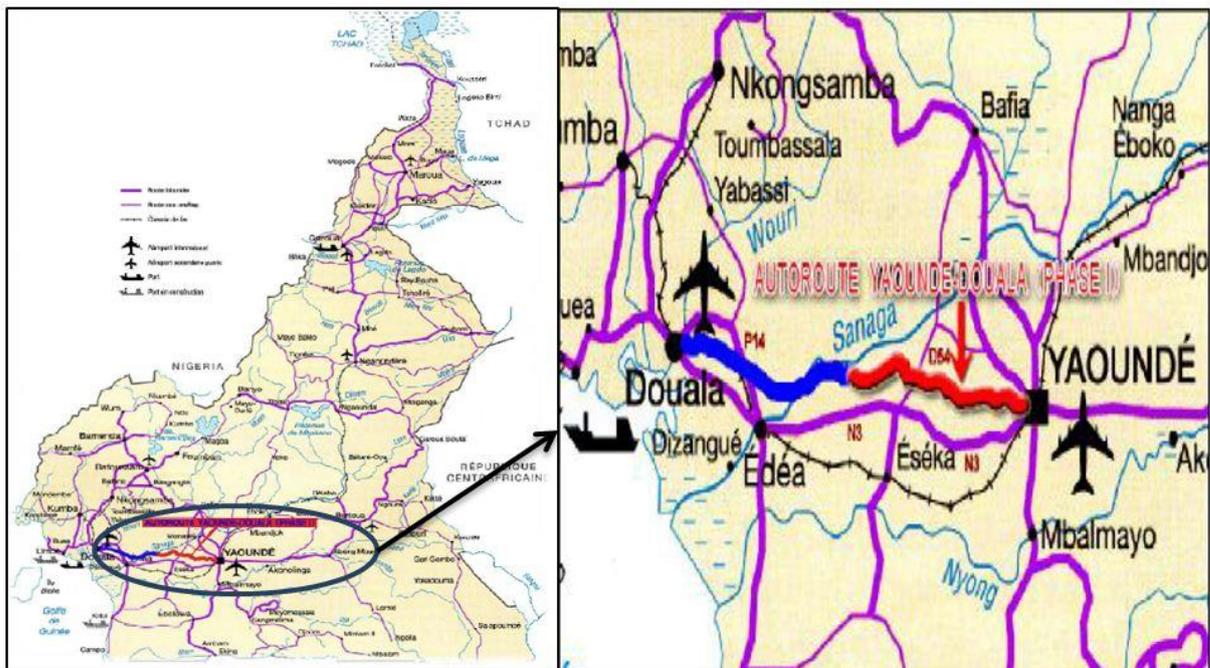


Figure 1: Plan de situation géographique du projet

La zone d'étude de notre ouvrage est située à proximité de YAOUNDE (PK1+956), qui se caractérise par un climat tropical forestier, avec une température moyenne annuelle de 24°C, mais qui varie entre 18° et 28° en saison des pluies, et entre 16° et 31° en saison sèche.

III. Objectifs du projet de fin d'études

Le présent projet de fin d'études a pour but d'effectuer les études techniques détaillées en vue de la construction d'un passage supérieur sur l'autoroute Yaoundé -Douala au PK1+956. Il s'agira donc de réaliser :

- Une analyse multicritère en vue du choix optimal du type d'ouvrage à mettre en œuvre pour ce franchissement ;
- Une note de calcul complète de l'ouvrage choisi ;
- Les différents plans d'exécution de l'ouvrage ;
- Un devis quantitatif et estimatif du coût de l'ouvrage ;
- Un planning prévisionnel des travaux.

Au terme de ce chapitre, il en ressort d'une part que la construction de l'autoroute Yaoundé-Douala s'avère être d'une grande importance du point de vue économique pour le Cameroun. La première phase de construction de cette autoroute concerne la réalisation des études sur un linéaire de 100 Km, et la réalisation des travaux sur un linéaire 68.3 Km et 25 Km de voie de rétablissement, à partir de Yaoundé, financé à 85% par EXIMBANK-CHINA et à 15% par le gouvernement Camerounais pour un montant de 338 670 000 000 TTC F CFA. Les missions de maîtrise d'œuvre confié au groupement SCET TUNISIE/LOUIS BERGER et d'assistance à maîtrise d'ouvrage géotechnique confié au LABOGENIE sont financés par le gouvernement du Cameroun à raison de 5 387 036 348 FCFA TTC et 1 724 088 043 FCFA TTC respectivement. D'autre part, le présent projet de fin d'études, de par ses objectifs, nous permettra de mettre en pratique les connaissances acquises tout au long de notre formation, mais également de nous familiariser avec le monde professionnel et de capitaliser de nouvelles compétences.

CHAPITRE II : ETUDE D'AVANT PROJET

Dans ce chapitre, il s'agit d'abord de présenter les données relatives à l'étude de l'ouvrage, ensuite de présenter les différentes solutions techniquement envisageables pour assurer le franchissement de l'autoroute, de procéder à une analyse multicritère afin d'effectuer un choix optimal du type d'ouvrage à mettre en œuvre, et enfin d'effectuer le pré-dimensionnement complet de la variante choisie.

I. Données relatives à l'étude de l'ouvrage

I.1. Données topographiques

L'ouvrage étudié assure le franchissement de l'autoroute YAOUNDE-DOUALA par une route au PK1+956 avec un biais de 65° par rapport à l'axe de l'autoroute. Les données topographiques sont fournies par l'entreprise, et nous en tirons les informations suivantes.

I.1.1. Données relatives à la voie portée

La voie portée par notre ouvrage est une route qui sera aménagée au droit de ce dernier et dont les caractéristiques des profils en long et en travers sont consignées dans le tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques de la voie portée

Caractéristiques	Unité	Valeur
Largeur de la demie-chaussée	m	3,5
Largeur du trottoir	m	1,5
Pente transversale	%	2,5
Pente longitudinale	%	1.4

Le profil en long de la voie portée est fourni en annexe 2.

I.1.2. Données relatives à la voie franchie

La voie franchie par notre ouvrage est une autoroute à chaussée bidirectionnelle à deux voies (2X2 voies) extensible en une autoroute à chaussée bidirectionnelle à trois voies (2X3 voies) dont le profil en travers type est caractérisé par les éléments consignés dans le tableau 2.

Tableau 2: Données relatives à la voie franchie

Données	Valeur	Unité
Largeur de la bande d'arrêt d'urgence	3	m
Largeur du terre-plein central en section courante	10,5	m
Largeur de la demie-chaussée	7,5 (3.75x2)	m
Largeur de berme	1	m

Les profils en travers de l'autoroute au PK1+940 et PK1.960 sont fournis en annexe 2.

Nous notons tout de même que cette autoroute sera transformée par la suite en autoroute bidirectionnelle à 3 voies par extension au niveau du terre-plein central.

I.2. Données géotechniques

Dans le cadre de notre projet, les études géotechniques ont été réalisées par le Bureau de Recherche d'Etudes et de Contrôle Géotechnique (BRECG). Elles permettent, connaissant de manière détaillée les caractéristiques des sols de la zone d'étude de déterminer le type de fondation le mieux adapté à notre ouvrage, le niveau d'ancrage de cette fondation.

De ces études, il en ressort que :

- Les sondages au pénétromètre dynamique lourd révèlent une épaisseur des sols résistants à partir de 10m de la surface avec des résistances dynamiques en pointes supérieures à 100bar.
- Les coupes de sondages carottés, tarière manuelle et sondages préssiométriques révèlent une hétérogénéité profonde (argile jaunâtre épaisse de 0.00 à 3.00m, argile rougeâtre de 10.00m d'épaisseur).
- La roche décomposée épaisse d'environ 12.00m coiffe la roche saine dont le toit est repéré à 25.8m.
- Le niveau de la nappe a été repéré à 16.00m (qui peut varier considérablement en fonction des saisons).

Ces informations sont résumées sur la coupe stratigraphique représentée par la figure 2 :

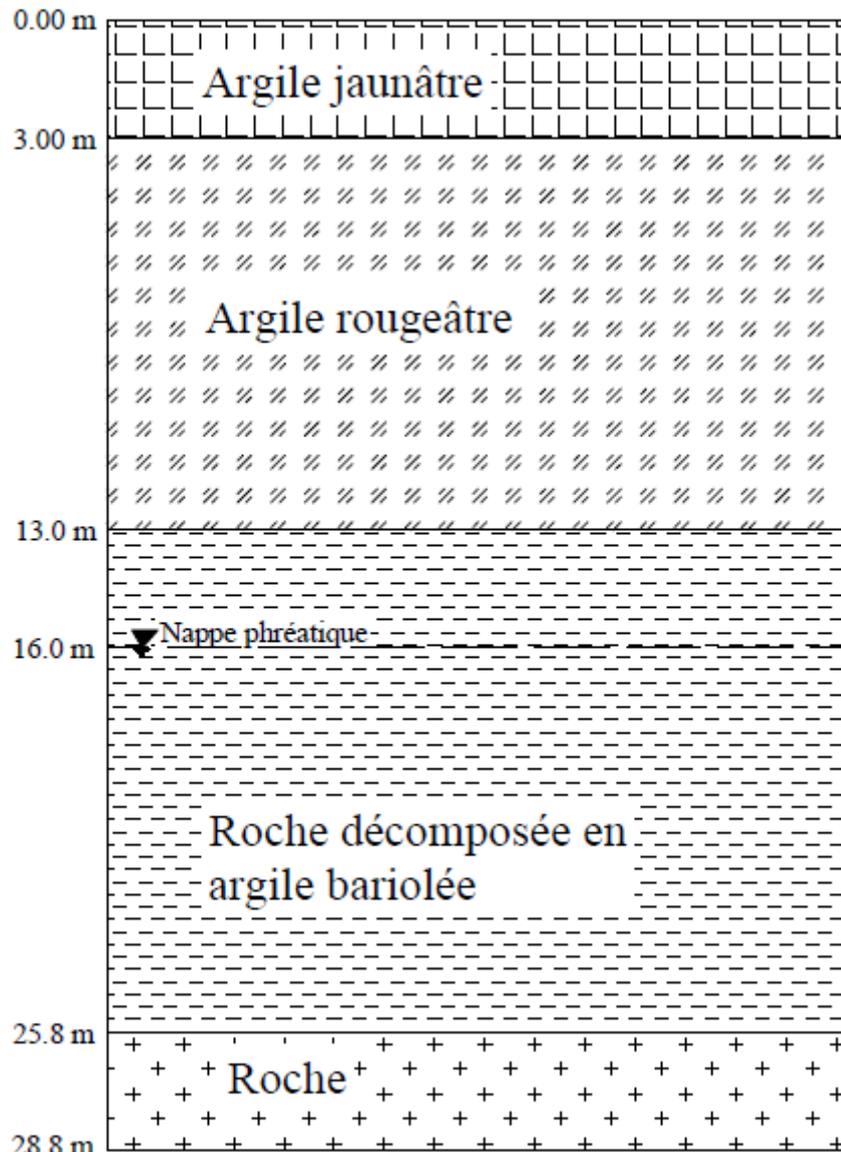


Figure 2: Coupe stratigraphique du sol

Le Bureau de Recherche d'Etudes et de Contrôle Géotechnique (BRECG) préconise pour notre ouvrage le système de fondation profonde, qui bien qu'étant une solution onéreuse, est plus sécurisante. Il s'agit des pieux de 1.2m de diamètre, forés à la boue, dont la capacité portante en fonction de la profondeur d'encrage est donnée en annexe 3.

II. Détermination et implantation des appuis

L'implantation des appuis est une étape très importante dans la conception, puisque le choix du type d'ouvrage ainsi que son aspect général en dépendent. Cette implantation s'effectue principalement sur la base des données topographiques, les données géotechniques et les données fonctionnelles.

Dans cette partie, il s'agit donc de l'implantation sommaire des appuis et de la définition des travures qui en résulte, c'est-à-dire le nombre et la longueur des travées, ainsi que la répartition de ces dernières, de manière à avoir la disposition la plus harmonieuse possible.

Au regard des données relatives à l'étude de l'ouvrage et des recommandations du « Ponts-Dalles : Guide de conception » du SETRA, nous adopterons un nombre pair de travées, avec équilibrage des deux travées centrales, et une répartition décroissante en longueur des travées centrales vers chacune des extrémités. Les appuis seront donc implantés de la manière suivante :

- Un appui central sur le terre-plein central de l'autoroute,
- Deux appuis intermédiaires de part et d'autre de la chaussée (au niveau des bermes)
- Les pile-culées au niveau des talus

Dans le but de respecter la condition de non soulèvement des appuis et pour une réparation optimale, nous observons la recommandation suivante :

$$0.5 L \leq l \leq 0.85 L \text{ [6].}$$

Où L est la portée des travées centrales et l celle des travées de rives.

Nous avons alors : $L = 19.6 \text{ m}$ et $l = 14 \text{ m}$

III. Choix du type d'ouvrage : Analyse multicritère

Il s'agit ici de sélectionner parmi les types d'ouvrages définis par le SETRA, toutes les solutions techniquement envisageables, et de procéder par élimination, en se basant sur des critères tels que les contraintes architecturales, environnementales, financières, et de faisabilité, pour retenir la solution la mieux adaptée à notre projet.

III.1. Différents types d'ouvrages pour la gamme de portée

Le paramètre fondamental du choix du type d'ouvrage est la portée maximale qui est de 19.6 m dans notre cas, et les figures 3 et 4 nous donnent les types d'ouvrages envisageables en fonction de la gamme de portée :

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

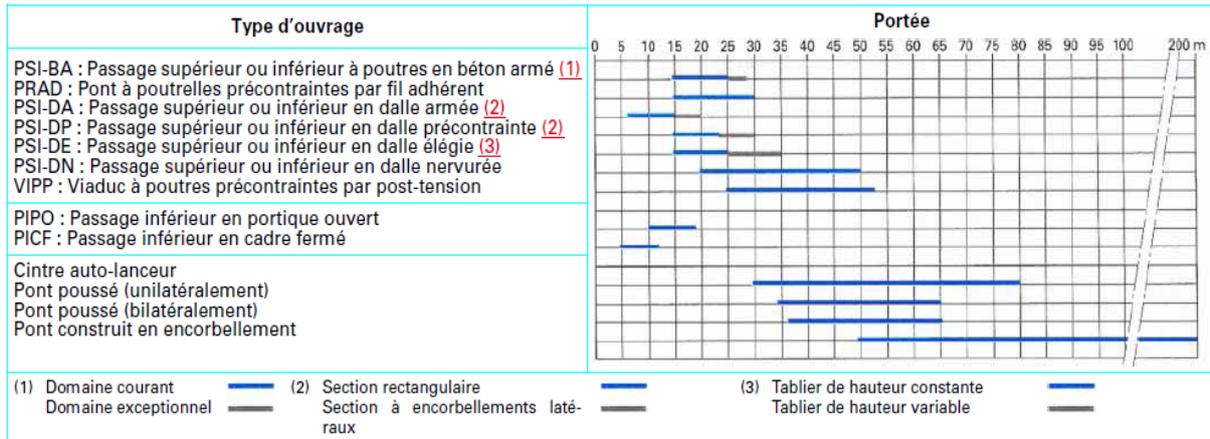


Figure 3: Ouvrages possibles en béton en fonction de la gamme de portée [1].

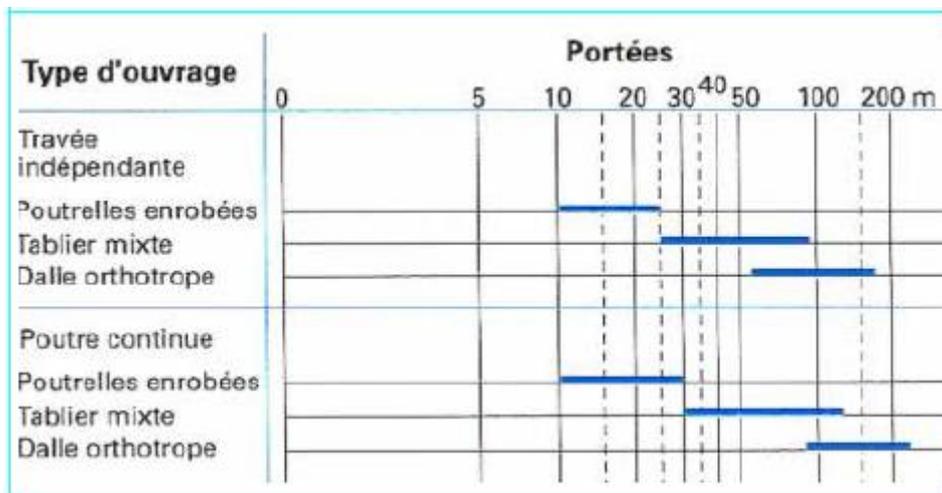


Figure 4: Ouvrages métalliques et mixtes possibles en fonction de la gamme de portée [1].

Dans le cas de notre ouvrage à plusieurs travées dont la portée principale est d'environ 20m les solutions suivantes peuvent être envisagées :

➤ Les ponts en béton armé

Ce sont les ponts dont les éléments de structure porteuse sont en béton armé. Les ponts de cette famille qui peuvent être adoptés pour le franchissement de notre obstacle sont les suivants :

- Le PSI-BA (pont à poutres en béton armé)
- Le PSI-DA (passage supérieur ou inférieur en dalle armée, ou pont dalle en béton armé)

➤ **Les ponts en béton précontraint**

Ils sont constitués de dalle précontrainte longitudinalement et armée transversalement, d'épaisseur constante ou variable, avec ou sans encorbellement latéraux. Les variantes de cette solution envisageables dans notre cas sont les suivantes :

- PSI-DP (pont en dalle précontrainte)
- PSI-DE (pont en dalle élévie)

➤ **Les ponts métalliques**

Ce sont les ponts dont les éléments de la structure porteuse sont métalliques ou mixtes. Les ponts de cette famille qui peuvent être adoptés pour le franchissement de notre obstacle sont les suivants :

- Pont à travée indépendante en poutrelles enrobées
- Pont à travée continue en poutrelles enrobées.

III.2. Choix d'une solution

La disponibilité des matériaux sur place, la facilité de construction et la maîtrise de la technique par les entreprises locales rendent les ponts en béton armé très compétitifs du point de vue économique, car ces conditions pourraient jouer favorablement sur le coût de l'ouvrage.

Les ponts en béton précontraint, bien que permettant d'atteindre de longues portées, nécessitent un matériel spécifique et une technologie de construction qui n'est maîtrisée que par les entreprises spécialisées. Un recours à ces entreprises augmentera sans doute le coût de l'ouvrage et le projet n'aura pas un impact significatif en termes de création d'emploi et de valeur ajoutée pour le pays, de plus, le nombre d'ouvrage à réaliser ne justifie pas l'investissement sur une telle technologie.

L'acier (pour les structures en charpente métallique) quant à lui a un coût extrêmement élevé dans les pays africains et nécessite un entretien très régulier, car étant en zone tropicale, le climat très humide accélère la corrosion.

Les avantages et les inconvénients de chaque solution sont consignés dans le tableau récapitulatif suivant (tableau3) :

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

Tableau 3: Récapitulatif des avantages et des inconvénients de chaque famille de pont

Solutions	Béton armé	Béton précontraint	Métallique
Avantages	Disponibilité des matériaux, technique maîtrisée localement, facilité de construction.	Permet d'atteindre de très grandes portées.	-Permet d'atteindre des grandes portées ; -exécution aisée.
Inconvénients	Ce type d'ouvrage n'est pas adapté pour de grandes portées.	-nécessite un matériel spécifique ; -Technologie non maitrisée localement ; -Impact non significatif en termes de création d'emploi ; -Pas de valeur ajoutée pour le pays.	-Coût extrêmement élevé de l'acier ; -nécessite un entretien très régulier (risque très élevé de rouille car le climat tropical est très humide) ; -Risque de phénomène de fatigue.

Au regard du tableau 3, la solution béton armé nous semble la mieux adaptée à notre projet. Il s'agira donc pour nous, dans ce qui suit, de mener une analyse comparative entre les deux variantes de pont en béton armé :

➤ **Le PSI-BA** (pont à poutres en béton armé)

Le tablier est constitué d'une série de poutres en béton armé associées à une dalle de couverture, et généralement reliées entre elles par des entretoises d'appui et éventuellement des entretoises intermédiaires. Les travées peuvent être indépendantes ou continues.

Les poutres sont de hauteurs constantes et peuvent comporter des talons. La dalle de couverture est d'épaisseur constante, sauf dans le cas des ponts à deux poutres, où cette épaisseur peut être variable afin de suivre le profil en travers de la chaussée.

➤ **Le PSI-DA** (passage supérieur ou inférieur en dalle armée, ou pont dalle en béton armé)

Le tablier est constitué par une dalle armée d'épaisseur constante ou variable, avec ou sans encorbellements latéraux, à travées indépendantes (pont à une travée) ou continues, et présentant un biais.

Le tableau 4 nous présente le domaine d'emploi, les avantages et les inconvénients de chacune de ces deux variantes.

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

Tableau 4: Récapitulatif de la comparaison entre les ponts à poutres et les ponts dalle en béton armé

Variante	Pont à poutre	Pont dalle
Domaine d'emploi	<p>Ouvrage adapté au franchissement en viaduc de brèches importantes, en longueur ou en hauteur, et aux sites difficiles d'accès.</p> <p>Il permet également le franchissement :</p> <ul style="list-style-type: none"> -D'une rivière ou d'un canal, lorsque les gabarits de navigation n'imposent pas de ménager des ouvertures exceptionnelles ; -D'une succession d'obstacles de faibles portées, mais rapprochés (routes, voies ferrées) pour lesquels des ouvrages isolés ne seraient ni compétitifs, ni très satisfaisant du point de vue esthétique ; -Des zones de terrains dégagés pour lesquels des remblais ne sont pas réalisables ou se révèlent non économiques ; -Des voies de circulations très importantes pour lesquelles nous ne voulons ni interrompre, ni même ralentir notablement la circulation ; -Des brèches de grande hauteur ou d'accès difficile, pour laquelle l'emploi des cintres appuyés sur le sol est difficilement envisageable. 	<p>Franchissement des routes ou d'autoroutes lorsque la portée biaise la plus longue ne dépasse pas 15m sans encorbellement et peut atteindre 20m avec encorbellement, et à un moindre degré, pour les ouvrages hydrauliques, certains ponts rails, tranchées ouvertes et passerelles pour piétons.</p>

**CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR
L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN**

<p>Avantages</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Principal avantage lié à son mode de construction qui permet d'éviter les recours aux cintres s'appuyant sur le sol ; -possibilité de recourir à la préfabrication des différents éléments, ce qui a une incidence positive sur le délai d'exécution de l'ouvrage ; -Possibilité de fonctionnement isostatique, ce qui rend la structure insensible aux déformations imposées (tassement différentiel). 	<ul style="list-style-type: none"> -Minceur et légèreté relatives -Construction rustique (absence de retombées) -Grande réserve de sécurité -Liberté dans la conception des formes -Economie de coffrages -Exécution aisée -Minimise la quantité du remblai d'accès -très grande inertie
<p>Inconvénients</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Ce type de structure s'adapte très difficilement aux franchissements biais ou courbes ; -Pour profiter au mieux de la préfabrication des différents éléments, il est souhaitable de pouvoir implanter les appuis à intervalles réguliers pour réaliser des travées de longueur égales, ce qui peut constituer un handicap pour ce type d'ouvrage. -Réalisation très coûteuse en main d'œuvre et matériels. -Mauvaise résistance des poutres contre les chocs des véhicules. 	<ul style="list-style-type: none"> -Risque de délamination (séparation en lamelle d'un matériau micro moléculaire) du béton : le béton se dégrade en feuillet sur quelques millimètres d'épaisseur essentiellement sur la face supérieure de la dalle. -dalle obligatoirement monolithique.

CHOIX : En raison de son domaine d'emploi bien adapté à notre besoin (franchissement d'une voie autoroutière) et de sa multitude d'avantages, nous choisissons la variante Pont dalle armée (PSI-DA).

IV. Pré-dimensionnement de l'ouvrage

Après avoir recueilli les données relatives à l'étude du franchissement et après avoir effectué le choix du type d'ouvrage le mieux adapté compte tenu des différentes contraintes, cette partie s'appuiera sur les documents de référence du SETRA, afin d'effectuer un pré-dimensionnement complet des différentes parties de l'ouvrage.

IV.1. Le tablier

IV.1.1. Morphologie

L'ouvrage est constitué d'une dalle de béton armé coulée sur place, à inertie constante et à plusieurs travées continues sur appuis simples.

IV.1.2. Forme générale

La forme transversale du tablier-dalle est fonction des caractéristiques géométriques de la voie portée.

Nous choisissons un tablier présentant un profil en dos d'âne, ce qui nous permettra de rattraper le devers de la voie portée au niveau de la face supérieure de la dalle, mais également de réaliser la chape d'étanchéité et le revêtement avec une épaisseur constante.

De plus, ce tablier présentera des légers encorbellements latéraux (juste en dessous des trottoirs qui travailleront en porte-à-faux) dans le but d'alléger la section du béton tout en augmentant son rendement géométrique, mais aussi pour des raisons d'ordre esthétique.

IV.1.3. Largeur de la dalle

La largeur droite de la dalle est fonction de la largeur de la voie portée (10 m). Nous choisissons en première approche, une largeur de 10.2 m pour tenir compte des différents équipements que nous y disposerons. Cette largeur qui reste inférieure à la portée principale rend le tablier peu vulnérable aux effets des déformations imposées (tassement des cintres d'appui, gradient de température) et permet d'éviter l'effet tunnel qui peut constituer une gêne pour les usagers de l'autoroute [6].

IV.1.4. Epaisseur de la dalle

Pour le pré-dimensionnement de l'épaisseur de notre dalle, nous utiliserons deux méthodes, la lecture sur l'abaque et le calcul numérique (formule de l'élanement) :

- Lecture sur l'abaque

L'épaisseur de la dalle peut être déterminée par lecture sur les abaques de dimensionnement dans le cas d'ouvrages à une, deux, trois ou quatre travées symétriques [6].

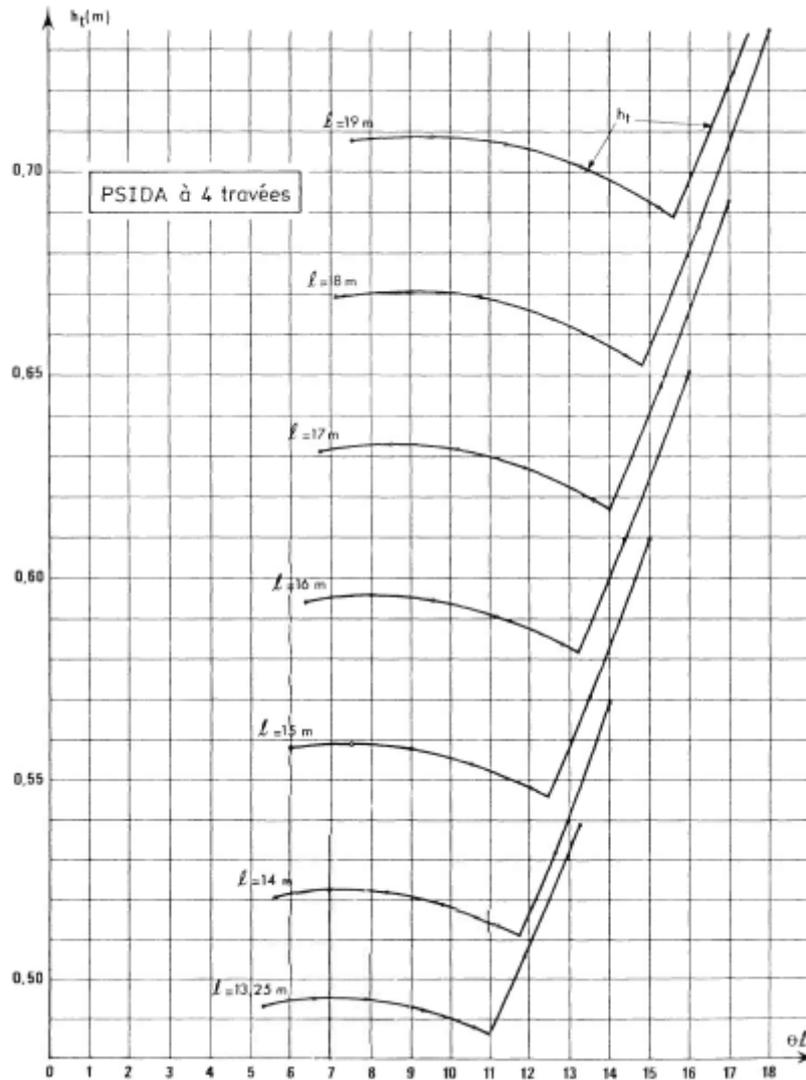


Figure 5: Epaisseur d'un pont-dalle en BA à quatre travées [6].

Sur cet abaque :

θ désigne le rapport de la portée de la travée de rive à celle de la travée centrale

h_t désigne la hauteur du tablier

l désigne la portée de la travée centrale

Nous avons alors : $\theta = \frac{14.5}{19.6} = 0.74$

La lecture sur l'abaque nous donne alors $h_t \approx 0.70 m$

- **Calcul numérique**

Pour le calcul numérique, nous nous servons de l'élanement de la dalle, en utilisant la formule suivante :

$$h_t = \left(\frac{1}{23} \text{ à } \frac{1}{28}\right) l_{max} \text{ et } h_t \geq 12 \text{ cm [16].}$$

Dans notre cas, $l_{max} = 19.6m$

Nous avons alors

$$\frac{1}{28} \times 19.6 \leq h_t \leq \frac{1}{23} \times 19.6$$
$$0.7 m \leq h_t \leq 0.85 m$$

Nous prenons donc comme épaisseur de la dalle de notre tablier $h_t = 0.70m$

IV.1.5. Dimension des encorbellements latéraux

La forme générale de notre dalle est représentée sur la figure 6 :

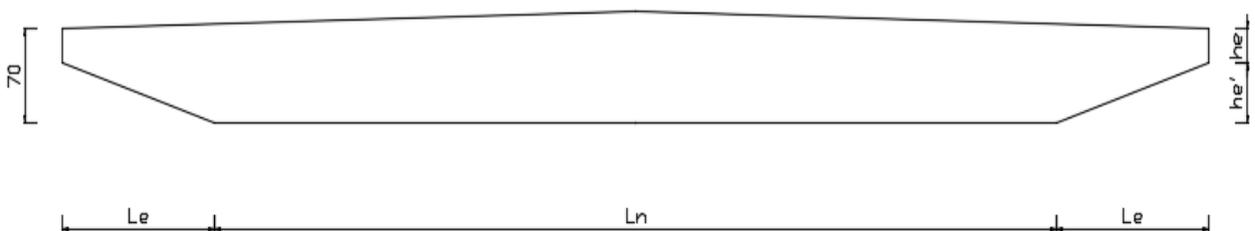


Figure 6: Forme générale de la dalle

Nous devons avoir :

$$L_n \geq 0.5L_t \text{ et } 2L_e \leq 0.2l_c \text{ [16].}$$

Où L_t est la largeur totale du pont et l_c est la portée de la travée principale.

Dans notre cas, nous avons $L_t = 10.64 m$ et $L_c = 19.60 m$

L'application numérique nous donne :

$$L_n \geq 5.32 m \text{ et } 2L_e \leq 3.92 m$$

Nous prenons L_n égale à la largeur roulable de l'ouvrage et nous avons alors :

$$L_n = 7.5 \text{ m} \quad \text{et} \quad L_e = 1.35 \text{ m}$$

Pour calculer h_e , il est recommandé de prendre une inclinaison de la dalle voisine de $1/2$ par rapport à la verticale [6]. Notre dalle n'étant pas réellement une dalle à encorbellement, nous prenons une pente $P = 1/3$.

Nous avons alors :

$$h'_e = P \times L_e = 0.45 \text{ m} \quad \text{et} \quad h_e = 0.70 - h'_e = 0.25 \text{ m}.$$

IV.2. Les appuis

Dans cette partie, il s'agira principalement d'effectuer le choix, la conception et le pré-dimensionnement des appuis, conformément aux recommandations du « PP 73 » du SETRA.

IV.2.1. Dispositions pratiques

Les appuis de notre ouvrage sont numérotés de la manière suivante :

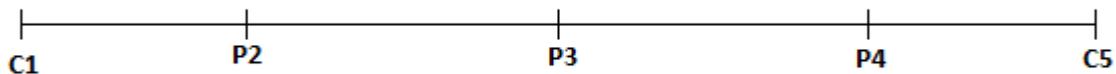


Figure 7: Numérotation des appuis

Sur une ligne d'appuis intermédiaire, un espacement raisonnable des points d'appuis correspond à $1/6$ environ de la portée biaise de la plus grande travée adjacente ; il peut être diminué sans inconvénient si le pont est droit ou peu biais [7]. Nous notons cet espacement e et nous avons : $e = \frac{1}{6} \times 19.6 = 3.27 \text{ m}$

Cependant, cette règle n'étant pas impérative, nous prenons : $e = 3.15 \text{ m}$, d'où trois points d'appuis dans le sens transversal.

IV.2.2. Choix et conception des piles (appui P2, P3, P4)

Dans cette partie, nous allons procéder à une analyse comparative des diverses structures (et formes) d'appuis, dans le but d'effectuer un choix optimal.

IV.2.2.1. Choix du type de pile

Une pile (appuis central et intermédiaire) est composée de :

- La fondation qui est la partie de l'appui qui permet la transmission des efforts des piles vers le sol de fondation. En fonction des données géotechniques, elles peuvent être constituées d'une semelle (isolée ou filante), reposer directement sur le sol de fondation, ou sur pieux dans le cas des fondations profondes.
- La superstructure qui, en fonction des données géotechniques et fonctionnelles (données relatives à la voie portée, à l'obstacle à franchir) peut être constituée de voiles (longues ou courtes), par une file de colonne, ou d'un assemblage de voile et de colonnes.

Les différents types d'appuis ainsi que leurs descriptions sont renseignés dans le tableau 5 :

Tableau 5: Description des types de piles

Type d'appui	Description
Voile	Ce type d'appui se compose d'un ou de plusieurs voiles permettant la transmission des charges issues du tablier aux fondations. Ils sont mécaniquement intéressants du fait qu'ils assurent une rigidité transversale importante. Ils sont principalement utilisés dans le cas des ouvrages franchissant une voie autoroutière et assurent également la sécurité de l'ouvrage en résistant aux chocs des véhicules (les chocs de véhicules peuvent causer des dégâts importants si la rigidité de l'appui est insuffisante).
Colonne ou poteau	Dans ce cas, la transmission des efforts est assurée par des colonnes verticales, généralement reliées entre elle par un chevêtre qui permet d'assurer une rigidité suffisante dans le sens transversal, et également la mise en place des vérins (pour le changement des appareils d'appuis). Ce type d'appui est principalement utilisé en zone marine, car les files de colonnes circulaires limitent les perturbations d'écoulement grâce à leur forme aérodynamique.

De cette description, nous pouvons conclure que les appuis constitués de voiles s'adaptent mieux à notre projet, qui a comme obstacle à franchir une voie autoroutière.

IV.2.2.2. Caractéristiques géométriques des piles

a. Nombre et répartition des éléments

Le nombre et la répartition des éléments d'appui est principalement tributaire du nombre de points d'appui. Dans Le cas de trois points d'appuis, une solution s'impose : celle d'un voile unique [7].

b. Forme

Les formes sont classées en groupes et en types :

- Suivant le sens longitudinal par rapport à l'ouvrage, nous pouvons distinguer trois groupes, selon l'inclinaison des faces latérales ou la variation de la section horizontale.
 - Parements (groupe 1) : verticaux : épaisseur constante
 - Fruit négatif (groupe 2) : épaisseur croissante de la base au sommet
 - Fruit positif (groupe 3) : épaisseur décroissante de la base vers le sommet
- Suivant le sens transversal (parallèlement à la ligne d'appui), nous pouvons distinguer trois types de base, caractérisés par des sections horizontales rectangulaires. Ces trois types sont représentés sur la figure 8 :

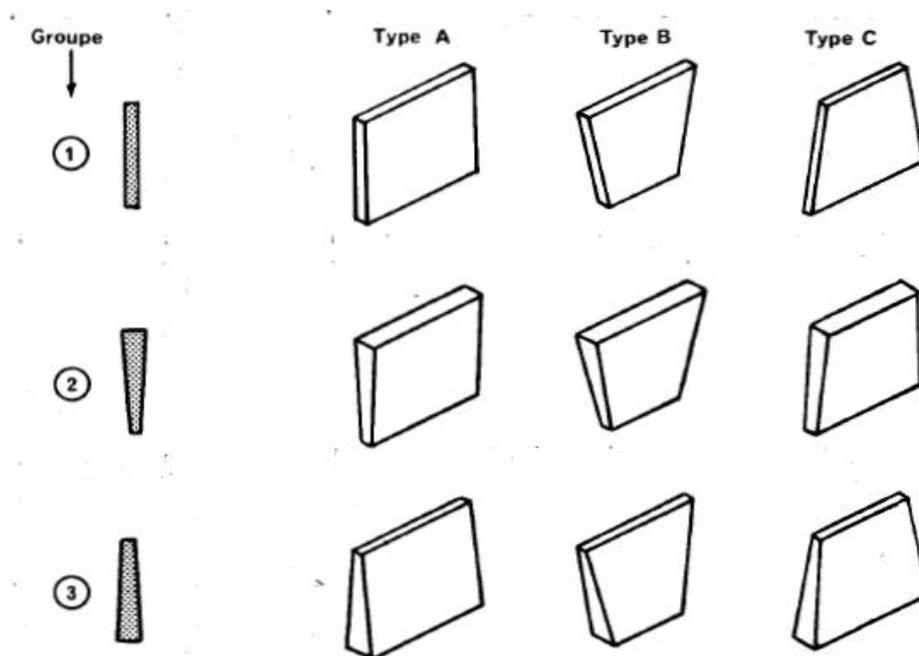


Figure 8: Formes et types de piles type SETRA [7].

Pour notre ouvrage, nous choisissons le groupe 1 et le type A, choix qui se justifie principalement par sa facilité de mise en œuvre.

c. Hauteur vue

La hauteur vue est une donnée imposée par les caractéristiques géométriques du franchissement. C'est donc une donnée sur laquelle aucun choix n'est possible. Cette hauteur varie d'un appui à un autre, du fait de la pente longitudinale de l'ouvrage et du profil en travers de la voie franchie.

d. Longueur d'appui

Elle est mesurée parallèlement à la ligne d'appui, c'est-à-dire dans le sens transversal biais par rapport à l'ouvrage. Cette distance est limitée par les bords extrêmes de l'intrados de la dalle. Nous prenons $L=7.5m$.

e. Epaisseur des appuis

Elle est mesurée perpendiculairement à la ligne d'appui. Le choix de cette dimension est à faire sur la base d'un certain nombre de critères, tant géométriques que mécanique, économique et esthétique.

Dans le sens longitudinal, l'épaisseur des voiles sera normalement de 0.5m à 0.8m afin de respecter les proportions entre divers paramètres : hauteur du tirant d'air, épaisseur du tablier, largeur des fûts, ou tout au moins largeur de leur partie supérieure [7]. Cette recommandation se traduit par les inéquations suivantes :

$$0.85h \leq E \leq 1.15h \quad \text{Et} \quad 0.5 \leq E \leq 0.8$$

Où h représente la hauteur du tirant d'air et E l'épaisseur du voile.

Dans notre cas, pour un tirant d'air $h = 7 m$, nous avons :

$$0.595m \leq E \leq 0.805m$$

Nous prenons alors $E = 0.70m$.

f. Raccordement avec la fondation

Notre pile étant constitué d'un voile unique de forme rectangulaire, elle est encastree dans la semelle de liaison. Les conditions déterminantes seront des conditions d'exécution (travail en dehors de la nappe, limitation des terrassements en fonction du profil en remblai ou en déblai) et des conditions structurelles (résistance aux affouillements, chocs éventuels) ou accessoirement esthétiques.

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

La cote de la semelle de liaison sera le plus souvent choisie en fonction du niveau du terrain naturel, ou après les terrassements si ceux-ci sont effectués avant la fondation, et en tenant compte de la nappe phréatique [11].

g. Hauteur des appuis

A l'aide des données du profil en long de la voie portée par notre ouvrage (côtes projet), nous définissons les paramètres récapitulés dans le tableau 6 :

Tableau 6: Hauteur des piles

Pile	Côte face supérieure du tablier (m)	Epaisseur de l'axe du tablier et couverture (cm)	Hauteur libre entre tablier et appui (cm)	Côte de la limite supérieure de l'appui (m)	Hauteur de l'appui (m)	Côte de la limite supérieure de la semelle de liaison (m)
P2	767,745	89.15	25	766,604	7	759,604
P3	767,471			766,329	6,5	759,829
P4	767,196			766,0545	6,5	759,554

IV.2.3. Choix et conception des piles-culées

Dans cette partie, nous allons procéder de la même manière que pour les piles, en proposant les différentes variantes pouvant être adoptées et ensuite de choisir celle qui s'adapte le mieux à notre projet.

IV.2.3.1. Choix du type de pile-culée

Une pile-culée se compose principalement de :

- Une fondation qui peut être superficielle ou profonde,
- Une partie intermédiaire composée d'éléments verticaux transmettant les efforts vers la fondation,
- Une partie supérieure sur laquelle repose le tablier.

Les différents types de piles-culées ainsi que leurs descriptions sont renseignés dans le tableau 7 :

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

Tableau 7: Description des différents types de piles-culées

Type	Description
Culées enterrées	<p>Ce sont celles dont la structure porteuse est noyée dans le remblai d'accès à l'ouvrage. Elles assurent essentiellement une fonction porteuse car elles sont relativement peu sollicitées par des poussées de terres, hors mis ceux s'exerçant sur le mur garde grève.</p> <p>Ce type de culée s'adapte facilement pour tout type de fondation et à n'importe quelle hauteur de remblais qui sont généralement talutés à 3H/2V.</p> <p>Si le sol présente une bonne capacité portante, la culée peut être fondée superficiellement ou par l'intermédiaire d'un massif de gros béton. Par contre, lorsque le sol en place ne présente pas une bonne capacité portante sur une profondeur telle qu'il n'est pas économique d'effectuer une purge, la culée est alors fondée sur des pieux.</p>
Culées remblayées	<p>Ce type de culée est constitué d'un ensemble de murs ou voiles en béton armé. Sur l'un d'entre eux appelé mur de front, repose le tablier de l'ouvrage. Les autres sont des éléments latéraux appelés murs en ailes ou murs en retour selon qu'ils sont parallèle ou pas à l'axe longitudinale de l'ouvrage.</p> <p>Ce type de culée se conçoit essentiellement avec des fondations superficielles, ce qui impose un sol de bonne capacité portante.</p>
Culées creuses	<p>Ce type de culée comporte un mur de front, des murs en retour et platelages supérieurs, formant ainsi une boîte renversée dans laquelle le remblai est taluté de manière à ne pas exercer de poussée sur le mur de front.</p> <p>Il s'agit d'une construction complexe que l'on conçoit uniquement dans des cas exceptionnels</p>

De ce qui précède, nous choisissons d'adopter des culées enterrées à futs circulaires, transmettant les efforts vers le sol.

Ce choix se justifie en plus des contraintes géotechniques, par la facilité de conception et d'exécution de ce type de culée. De plus, du fait du biais que présente notre ouvrage, les efforts horizontaux dus aux poussées des terres et du tablier présentent des lignes d'actions qui génèrent une flexion déviée, à laquelle la section circulaire des futs résiste bien.

IV.2.3.3. Caractéristiques géométriques des culées

Ce type de culée est principalement constitué de :

- Sommier d'appui
- Mur garde-grève
- Corbeau d'appui
- Mur en retour
- Fûts circulaires

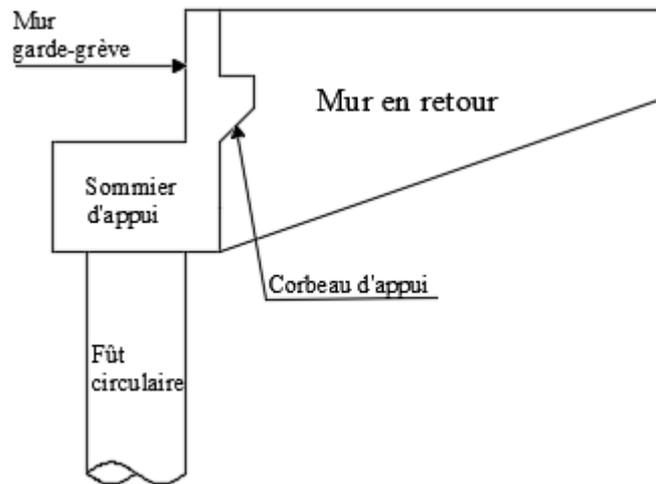


Figure 9: Description de la culée

a. Sommier d'appui

Il joue le rôle de chevêtre en constituant l'appui du tablier et il repose sur des fûts transmettant les charges au sol. Il permet l'implantation des appareils d'appui et la mise en place des vérins pour le changement de ces derniers. Il assure également l'évacuation des eaux, du moins en phase de construction du tablier, d'où la nécessité de donner une pente d'au moins 2% à l'arase supérieure du sommier et de réaliser une cuvette contre le mur garde-grève pour recueillir les eaux.

Sa longueur dépend essentiellement de la largeur du tablier ; nous prenons $L=10.2m$

Le sommier d'appui étant un élément porteur, il doit être rigide vis-à-vis du tablier, ce qui implique que sa hauteur soit suffisante. Si h_t est la hauteur du tablier et h_c celle du sommier, la condition de rigidité a pour expression :

$$h_c \geq 1.25h_t [7]$$

Nous avons alors $h_c \geq 0.875m$ et nous prenons $h_c = 1m$

Le SETRA précise dans le PP73 que cette hauteur doit être respectée, même si elle est surabondante vis-à-vis des efforts de flexion et de cisaillement.

➤ Les valeurs des autres paramètres sont déterminées, conformément aux prescriptions du PP73 qui nous propose plusieurs variantes de piles-culées enterrées, parmi lesquelles nous choisissons la variante N°4 illustrée par la figure 10 :

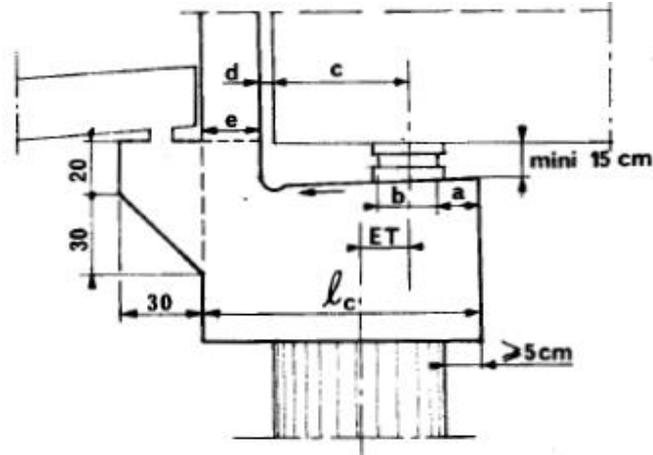


Figure 10: Culée type SETRA [7]

Sur cette figure :

$$a \geq 10cm$$

b : largeur des plaques d'appui

c : longueur d'about du tablier

$$d \geq 1cm \text{ (2cm si le joint le permet)}$$

e : épaisseur du mur garde-grève

ET : excentricité de l'axe d'appui par rapport à l'axe du fût

l_c : Largeur du sommier d'appui

$$l_c = a + \frac{b}{2} + c + d + e$$

b. Mur garde-grève

Il a pour fonction de séparer physiquement le remblai de l'ouvrage. Il s'agit d'un voile en béton armé construit après achèvement du tablier par reprise de bétonnage sur le sommier.

Cet élément doit résister aux efforts des poussées des terres, aux efforts de freinage dû aux charges d'exploitation et aux efforts transmis par la dalle de transition.

➤ Sa hauteur est variable, égale à la hauteur du tablier ajouté de la hauteur libre entre l'arase supérieur du sommier et la face inférieure du tablier. Dans le cas de notre ouvrage, cette hauteur varie de 1.15m (axe du tablier) à 1.02m (extrémité du tablier).

➤ Son épaisseur est fonction des efforts qu'il doit supporter. A titre de pré-dimensionnement, si h désigne sa hauteur, son épaisseur e (en m) peut être prise égale à :

$$e = \max(0.3 ; \frac{h}{8}) \quad [2].$$

Nous avons ainsi : $e = 0.3m$

c. Corbeau d'appui

A l'arrière du mur garde-grève, on trouve le corbeau d'appui de la dalle de transition. Il est conçu pour jouer le rôle d'appui linéaire pour la dalle de transition. Ses dimensions sont celles qui figurent sur la figure 10.

d. Mur en retour

Ce sont des voiles en béton armé, liés au mur garde-grève, conçus pour retenir latéralement les terres en tête de culées enterrées. Leur dimensionnement est fonction des efforts contre lesquels ils doivent résister, et la formule suivante lie la longueur à l'épaisseur : $E = \frac{L+2}{20}$ avec $2m \leq L \leq 6m$ et $E \geq 20cm$ [7].

En prenant $L = 4m$, nous avons $E = 30cm$.

e. Fûts

Ils ont pour rôle de transmettre les charges issues du sommier vers le système de fondation.

Etant donné que notre ouvrage devra être fondé sur des pieux (Cf. conclusions de l'étude géotechnique), ces fûts ont été étudiés de la même manière que les pieux des piles car ils constitueront le système de fondation des culées.

De tout ce qui précède, nous récapitulons dans le tableau 8, les différents paramètres des culées :

Tableau 8: Récapitulatif des caractéristiques de la culée

Paramètre	Valeur	Unité	Précision
E	0,3	m	Épaisseur du mur garde-grève
Hmax	1,15	m	Hauteur max du mur garde-grève
Hmin	0,95	m	Hauteur min du mur garde-grève
ET	0	m	Excentricité de l'axe d'appui par rapport à l'axe du fût
Lc	1,5	m	Largeur du sommier
Hc	1	m	Hauteur du sommier
L	4	m	Longueur du mur en retour
E	0,3	m	Épaisseur du mur en retour

IV.3. La fondation

Nous rappelons que le système de fondation profonde sera constitué de pieux de 1.2m de diamètre, forés à la boue, dont la capacité portante en fonction de la profondeur d'encrage est donnée dans le tableau en annexe 3.

Il s'agira donc principalement dans cette partie, de l'étude de la semelle de liaison des pieux.

D'après les résultats des études géotechniques, nous disposerons une fille de trois pieux de 1.2m de diamètre, parallèlement à la ligne d'appui, et les caractéristiques de la semelle de liaison sont les suivantes.

IV.3.1. Distance entre axes des pieux

La distance entre axe de deux pieux consécutifs doit être pris égale à : $l' \geq 3\emptyset$ [11].

Nous avons alors $l' \geq 3.60m$

IV.3.2. Longueur de la semelle de liaison

La longueur de la semelle est déterminée dans le cas d'un voile unique par la formule suivante : $L_s = (3n - 1)\phi$ si $l' \geq 3\phi$, où n est le nombre de pieux [7].

$$\text{Nous avons alors : } L_s = (3 \times 3 - 1)1.2 = 9.60m$$

IV.3.3. Largeur de la semelle de liaison

Elle dépend de l'arrangement géométrique du système de pieux, caractérisé par le nombre de file et la distance entre axe des files. Si N est le nombre de file et l la distance entre deux files, la largeur de la semelle de liaison est donnée par : $B = (N - 1)l + 2\phi$ [7].

$$\text{Dans notre cas, } N = 1 \text{ et } l = 0, \text{ d'où } B = 2.4m$$

IV.3.4. Hauteur de la semelle

La semelle de liaison doit satisfaire aux conditions de rigidité et de fonctionnement mécanique.

Dans le cas des pieux forés de grand diamètre, et dans la mesure où un entre-axe de trois diamètres entre les pieux est respecté, l'épaisseur h de la semelle de liaison est prise égale à 1.2 fois le diamètre commun des pieux [2].

$$h_t = 1.2\phi = 1.44m$$

Les caractéristiques des semelles de liaisons sont récapitulées dans le tableau 9 :

Tableau 9: Caractéristiques des semelles de liaison

Appui	Longueur de la semelle (en m)	Largeur de la semelle (en m)	Hauteur de la semelle (en m)	Côte supérieure de la semelle (en m)	Côte d'implantation de la semelle de liaison (en m)
P2	9,6	2,4	1,5	759,604	758,104
P3				759,829	758,329
P4				759,554	758,054

V. Les équipements du pont

Les équipements du pont sont des éléments qui ne concourent pas, par définition à la résistance de l'ouvrage, mais dont la présence a une incidence sur l'aspect, la pérennité, l'entretien, l'accessibilité de ce dernier, et également sur le confort et la sécurité des usagers. Nous distinguons :

- Les appareils d'appui
- Le revêtement du tablier
- Les trottoirs
- Les dispositifs de retenues
- Les joints de chassées et de trottoir
- Les systèmes d'évacuation des eaux
- Les corniches
- La dalle de transition
- Les autres équipements divers (les perrés, l'éclairage, la signalisation, les écrans acoustiques, les dispositifs de visite)

Dans cette partie, nous nous limiterons uniquement à leur description et leur choix.

V.1. Les appareils d'appui

Les appareils d'appui jouent un rôle structural très important, car ce sont les éléments par lesquels le tablier repose sur les appuis et leurs transmettent les efforts verticaux et horizontaux. Les appareils d'appui reprennent donc :

- Les efforts normaux provenant des efforts verticaux (poids propre et surcharges)
- Les efforts horizontaux provenant des efforts de freinage, de retrait (et fluage), de dilatation thermique et de rotation aux appuis.

Dans le cadre de notre projet, le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) prescrit l'utilisation soit des appareils en élastomère fretté soit des appareils d'appui à pot.

Nous choisissons de mettre en œuvre les appareils d'appui en élastomère fretté, du fait de leur usage bien adapté pour les ponts courants, mais aussi du fait de leur accessibilité.

Nous procéderons au dimensionnement des appareils d'appui ainsi que des bossages dans la suite, mais notons tout de même qu'ils sont constitués par un empilage de feuilles d'élastomère (caoutchouc) liées par vulcanisation à des tôles d'acier jouant le rôle de frettes.

V.2. Revêtement du tablier

Le revêtement du tablier comprend essentiellement la couche d'étanchéité et la couche de roulement. C'est l'un des éléments les plus importants, de par son rôle de protection de la structure (contre les infiltrations) et de sécurité des usagers (anti-dérapage).

V.2.1. Etanchéité

Le béton est un matériau poreux, qui même lorsqu'il est bien comprimé, n'est jamais parfaitement étanche, du fait de l'existence d'inévitables petites ségrégations locales. Pour protéger les armatures d'une corrosion accélérée, il est nécessaire de disposer une chape d'étanchéité sur toute la dalle du pont.

Il existe principalement trois types d'étanchéité :

- Etanchéité à base d'asphalte coulé,
- Etanchéité utilisant des résines synthétiques (Brais-résines),
- Etanchéité par feuilles préfabriquées.

Le guide technique « Ponts-dalles » du SETRA, nous donne les avantages et les inconvénients de chaque type d'étanchéité que nous avons joint en annexe 6.

Dans le cadre de notre projet, nous mettrons en œuvre une étanchéité par feuilles préfabriquées, au vu de ses nombreux avantages. Ces feuilles comportent une couche de bitume modifié par un polymère et une armature (non tissée de 200g/m³ environ).

V.2.2. Couche de roulement

Cette couche doit présenter un bon uni (confort) et offrir de bonnes caractéristiques antidérapantes (sécurité des usagers). Notre couche de roulement sera constituée par un tapis d'enrobés bitumineux de 6 cm d'épaisseur et de 2.2 t/m³ de masse volumique.

V.3. Les trottoirs

Le trottoir est un élément du profil en travers du pont dont le rôle est de protéger les piétons en les isolants par simple surélévation de 16 à 20 cm, de la circulation automobile. Ils sont constitués de la chaussée vers l'extérieur : d'une bordure, d'une contre bordure, d'une contre corniche et d'une corniche.

Lorsque les trottoirs sont nécessaires sur un pont, il convient de leurs donner une largeur convenable pour que deux voitures d'enfants puissent se croiser. Une dimension minimale de

1.40 m semble un minimum raisonnable, bien que la largeur minimale prévue par le guide d'Aménagement des Routes Principales (ARP) au chapitre 1 soit de 1m [2].

Dans le cadre de notre projet, nous mettrons en œuvre des trottoirs pleins (contre bordures et contre corniche inutiles) de 1 m de large, munis de trois gaines en PVC de 15 mm de diamètre pour les câblages d'électricité et de diverses communications (téléphone, internet et autres).

Les bordures seront de type T1 en béton armé et préfabriquées (1.65 KN/m) et le corps du trottoir sera rempli de gros béton.

V.4. Dispositif de sécurité

Ils sont placés sur les bords latéraux du pont, pour retenir des piétons ou des véhicules en perdition. Cet élément a une grande incidence sur l'aspect esthétique de l'ouvrage, mais son choix doit satisfaire prioritairement à des critères de sécurité.

Les niveaux de sécurité des dispositifs de retenue sont fixés par plusieurs normes, dont les européennes transposées en normes Françaises NF EN 1317.1 et 2, selon lesquelles on distingue :

- Pour les piétons, le niveau « garde-corps »,
- Pour les véhicules légers, le niveau N (retenue « normal » correspondant aux glissières),
- Pour les véhicules lourds, le niveau H (« haute » retenue, correspondant aux barrières).

Dans le cadre de notre projet, le Cahier des Clauses Techniques particulières (CCTP) prescrit la mise en place de Garde-corps niveau N2, dont les matériaux et les normes d'utilisation devront être conformes aux spécifications du dossier GC 77 du SETRA. Ce dossier du SETRA nous permet de calculer la hauteur du garde-corps à l'aide de la formule suivante :

$$h = 0.95 + 0.005H_c \pm 0.05 \text{ en m où } H_c \text{ est la hauteur maximale de chute}$$

Avec une hauteur de chute d'environ (hauteur maximale du trottoir au-dessus du sol de la brèche) d'environ 6 m, nous avons $h = 0.98m$.

Pour plus de sécurité, nous prendrons $h = 1.0m$ avec une masse de 0.48 kN/m.

V.5. Joints de chaussée et de trottoir

V.5.1. Joint de chaussée

Ils permettent d'assurer la transition entre le tablier et les chaussées adjacentes à l'ouvrage, mais aussi la continuité au niveau des joints de dilatation, tout en respectant les critères suivants :

- Assurer la liberté de mouvement du tablier du pont
- Assurer la continuité de la surface de roulement
- Produire le minimum de bruit et de vibration possible
- Etre étanche ou alors disposer d'un système d'évacuation des eaux

Dans le cadre de notre projet, le Cahier des Clauses Techniques particulières (CCTP) prescrit l'utilisation des joints de chaussée du type WOSD 50, soit du type WOSD 80 ou similaire. Il s'agit de joints à lèvres avec remplissage du vide par un matériau assurant l'étanchéité.

V.5.2. Joint de trottoir

D'après le dossier « JADE » du SETRA, contrairement à une idée préconçue, le fait de ne pas avoir à supporter une circulation lourde ne facilite pas la mise au point de solutions simples, efficaces, et fiable. Ceci tient au fait que la zone du trottoir est d'une géométrie parfois complexe et non standardisée. Néanmoins, dans le cadre de notre projet, le Cahier des Clauses Techniques particulières (CCTP) prescrit l'utilisation d'un joint léger de trottoir du type TO50.

V.6. Système d'évacuation des eaux

L'évacuation des eaux est nécessaire non seulement du point de vue de la durabilité de la structure, mais également pour la sécurité des usagers. A cet effet, les dispositifs d'évacuation des eaux sont destinés à assurer l'écoulement des eaux pluviales sur le tablier. Ils permettent en outre de protéger le tablier contre les inondations qui pourraient survenir à la surface de la chaussée.

Les eaux pluviales qui arrivent sur la surface du tablier sont évacuées par un ensemble de dispositif constitué :

- D'un drainage superficiel assuré par la pente transversale de la chaussée fixée à 2.5% et celle du trottoir fixée à 4%.
- D'une collecte longitudinale assurée par un caniveau fil d'eau de 25 cm de large.

- Des ouvrages ponctuels (avaloirs) de 125mm de diamètre reliés à des descentes d'eau.

Le dimensionnement complet du système d'évacuation des eaux est joint en annexe 4.

V.7. Les corniches

Les corniches ont pour principales fonctions :

- ✚ D'améliorer l'aspect architectural de l'ouvrage,
- ✚ De servir de larmier afin d'éviter le ruissellement de l'eau de pluie sur les parements de la structure.

Dans le cadre de notre projet, nous utiliserons les corniches préfabriquées en béton armé. Elles seront exécutées dans un moule métallique, ce qui améliorera leurs finitions et leurs formes architecturales. Elles seront posées sur une couche de mortier, de façon à régler finement leurs positions.

Il est conseillé de donner au-dessus de la corniche une pente transversale de l'ordre de 4% vers l'ouvrage pour faciliter l'évacuation des eaux pluviales [9].

V.7. Dalle de transition

La dalle de transition a pour rôle d'atténuer les effets de tassement du remblai à proximité de l'ouvrage. Elle est caractérisée par :

➤ Sa longueur

De façon générale, la dalle ne devra pas avoir une longueur supérieure à la hauteur du remblai sous-jacent dans le voisinage des appuis de rive, et pour une route nationale, on pourra choisir une longueur entre 3m et 1.5m [8].

Dans le cadre de notre projet, nous prenons une dalle de longueur 3.5m, pour tenir compte du biais de l'ouvrage.

➤ Sa largeur

La dalle doit contribuer à supporter la chaussée sous les zones circulées. Elle règnera donc au droit de la chaussée au sens géométrique et sa largeur sera celle de la chaussée (largeur roulable) augmentée de chaque côté de celle-ci d'un débord variable (0.5, 0.75 ou 1m) [8].

Nous choisissons un débord de 0.5m de chaque côté, notre dalle aura donc 8.5m de largeur.

➤ **Son inclinaison**

La dalle est posée sur une couche de gros béton de 10 cm d'épaisseur, avec une inclinaison longitudinale de 5% permettant le drainage des écoulements sous-terrain.

Parvenus au terme de ce chapitre, l'ouvrage qui fait l'objet de notre étude est un passage supérieur en pont dalle armée de 68.2 m de longueur totale, qui franchi l'autoroute Yaoundé-Douala au PK1+956 avec un biais de 65°.

Le tablier est une structure monolithique sur 5 appuis simples. Nous avons ainsi quatre travées de 14 m, 19.6 m, 19.6 m et 14 m de portées et 0.5m de longueur d'about à chaque extrémité.

Les appuis intermédiaires sont des voiles de 7.5 m de longueur, 0.7 m de largeur et 7 m de hauteur maximale (appui central), transmettant les efforts aux pieux circulaires de 1.2 m de diamètre par l'intermédiaire d'une semelle de liaison de 9.6 m de longueur, 2.4 m de largeur, et 1.5 m de hauteur.

Les appuis d'extrémités quant à eux sont des piles-culées enterrées reposant sur des fûts circulaires de 1.2 m de diamètre, par l'intermédiaire d'un sommier d'appui de 10.2m de longueur, 1.5 m de largeur et 1 m de hauteur.

CHAPITRE III : ETUDE DU PROJET D'EXECUTION

Ce chapitre présente les différents résultats obtenus par le dimensionnement de la variante adoptée, tout en indiquant les références, les règlements, les hypothèses de calcul des charges, et les caractéristiques des matériaux pris en compte pour le calcul. Nous trouverons en annexes de ce document, des notes de calcul détaillées des différents éléments de l'ouvrage.

I. BASES DE CALCUL

I.1. Normes et règlements de calcul

Les normes et règlements de calcul de notre ouvrage sont les suivantes :

- Fascicule 61 – Titre II : Programme de charge et épreuve des ponts-routes.
- Fascicule 62 – Titre 1 – Section 1 : Règles de techniques de conception et de calcul des ouvrages en béton armé suivant la méthode des états limites – BAEL 91 Révisé 99.
- Fascicule 62 – Titre 5 : Règles de conception et de calcul des fondations des ouvrages de Génie Civil.

I.2. Caractéristiques des matériaux

Le Cahier des Clauses techniques Particulières de notre projet prescrit un calcul en **fissuration préjudiciable** et l'utilisation des matériaux dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Béton **B35** pour tablier ; enrobage = 3 cm ;
- Béton **B30** pour piles, culées, dalles de transitions, semelles de liaison ; enrobage = 3 cm
- Ciment Portland CPA – CEMI 42.5 ;
- Granulat de Coefficient de Los Angeles < 30 ; $d/D = d/25$;
- Béton **B30** pour pieux, enrobage = 4 cm ;
- Nuance des armatures rondes lisses : Fe E 235 ;
- Nuance des armatures HA : Fe E 400 ;
- Matériaux de remblai pour comblement des fouilles et pour remblais contigus aux ouvrages ($CBR > 30$; $IP < 25$; $D = 50$ mm, $c = 0$, $\phi = 30^\circ$, $Ka = 0.333$, $\rho = 2$ t/m³) ;
- Actions permanentes : poids propre du tablier ($\gamma_{béton} = 25$ kN/m³) ; poids propre des équipements fixe de toute nature ($\gamma_{acier} = 78.5$ kN/m³) ;

I.3. Logiciels utilisés

Pour le dimensionnement de notre ouvrage, nous avons utilisé les logiciels suivants :

- Autodesk Structural Analysis (RSA) pour la modélisation et le calcul des différents éléments de l'ouvrage,
- Autodesk Autocad 2016 pour toutes les tâches de dessin,
- Autodesk Autocad structural detailing pour les plans de ferrailage de l'ouvrage,
- Microsoft Excel 2016 pour effectuer tout autre type de calcul.

I.4. Charges de calcul

Nous avons deux catégories de charges :

- Les charges permanentes
- Les charges d'exploitation

I.4.1. Charges permanentes

Le tableau 10 présente un récapitulatif des charges permanentes à prendre en compte pour le dimensionnement de notre pont.

Tableau 10: Charges permanentes à prendre en compte

Désignation	Valeur	Unité
Béton armé	25	KN/m ³
Revêtement en béton bitumineux	24	KN/m ³
Etanchéité (parafor pont)	22	KN/m ³
Bordure T1	0,56	KN/ml
Corps de trottoir	15	KN/m ³
Garde-corps N2	0,48	KN/ml

I.4.2. Charges d'exploitation

Conformément aux exigences du Cahier des Clauses Techniques Particulières de notre projet, les charges d'exploitations à prendre en compte (selon les prescriptions du Fascicule 61 Titre 2) pour le dimensionnement de notre ouvrage sont les suivantes :

- Le système de charges A

- Le système de charges B
- Les charges dues au convoi militaire Mc120
- Les charges sur trottoir
- Les efforts de freinage
- Les effets thermiques (température)
- Les charges sur remblai.

II. Etude du tablier de l'ouvrage

Dans cette partie, nous allons présenter d'une part, les différentes charges et surcharges susceptibles de solliciter la structure du pont, selon les prescriptions du Cahier des Clauses techniques Particulières du projet et du Fascicule 61 Titre 2, qui nous serviront pour la détermination des sollicitations défavorables, et d'autre part les résultats obtenus à l'aide du Logiciel RSA.

Le tablier de notre ouvrage est une dalle monolithique de 68.2 m de longueur sur cinq appuis simples. Nous avons ainsi quatre travées de 14 m, 19.6 m, 19.6 m et 14 m de portées, les travées de rive ayant chacune 0.5 m de longueur d'about.

II.1. Charges de calcul du tablier

II.1.1. Charges permanentes

Les charges permanentes à prendre en compte pour le calcul du tablier de l'ouvrage sont celles qui figurent dans le tableau 10. Il s'agit principalement des charges suivantes :

- Poids propre de la dalle
- Poids propre des éléments de couverture (étanchéité et revêtement)
- Poids propre du trottoir et des autres équipements (bordure, corniche et garde-corps)

D'après les prescriptions du Cahier des Clauses Techniques Particulières, les actions dues au poids propre des équipements fixes de toute nature seront prises en compte avec leurs valeurs caractéristiques, maximales et minimales, évaluées en se conformant aux dispositions du DC79 du SETRA. Le tableau 11 résume de manière non exhaustive ces dispositions :

Tableau 11: Coefficients pour le calcul des valeurs caractéristiques des charges permanentes

Partie de l'ouvrage	Coefficient de majoration	Coefficient de minoration
Dalle en béton armé	1.03	0.97
Etanchéité	1.2	0.8
Béton bitumineux	1.4	0.8
Trottoir	1.05	0.95

II.1.2. Charges d'exploitation

Il s'agit des charges d'exploitations prescrites par le maître d'ouvrage, que nous allons définir en nous référant au « Fascicule 61 Titre 2 ».

II.1.2.1. Terminologie

➤ **Largeur roulable (Lr)**

C'est la largeur entre bordures : $Lr = 7.5m$

➤ **Largeur chargeable (Lc)**

Pour une chaussée encadrée par deux bordures, nous avons : $Lc = Lr = 7.5m$

➤ **Nombre de voies de circulation (Nv) et largeur d'une voie (Lv)**

Le nombre de voies de circulation est donné par la formule suivante :

$$Nv = E \left(\frac{Lc}{3} \right) = E \left(\frac{7.5}{3} \right) = 2 \text{ voies}$$

Et la largeur d'une voie : $Lv = \frac{Lr}{Nv} = \frac{7.5}{2} = 3.75m$

➤ **Classe de pont**

Notre ouvrage est un pont de classe 1 d'après le texte normatif présenté dans le Fascicule 61 Titre 2 et récapitulé dans le tableau 12 :

Tableau 12: Classes de pont [15]

Classe	Largeur Roulable
I	$\geq 7m$
II	$5,5 m < L_r < 7m$
III	$\leq 5,5 m$

II.1.2.2. Système de charges A

D'après le fascicule 61 Titre 2, pour les ponts de portées maximales ne dépassant pas 200m de longueur, le règlement admet l'hypothèse de considérer une charge uniforme, dont l'intensité est donnée par la formule suivante :

$$A(l) = 2.30 + \frac{360}{l + 12} \text{ en } KN/m^2, \text{ où } l \text{ est la longueur chargée [3]}$$

La largeur et la longueur des zones chargées sont choisies de manière à produire l'effet maximal dans le tablier de l'ouvrage, d'après les règles formulées dans l'article 4 du « Fascicule 61 Titre 2 ».

$A(l)$ est multiplié par un coefficient a_1 , qui est fonction de la classe de pont et du nombre de voies chargées. Les valeurs de a_1 sont fournies par le tableau 13 :

Tableau 13: Valeurs du coefficient a_1

Classe de pont	Nombre de voies chargées				
	1	2	3	4	≥ 5
1	1	1	0,9	0,75	0,7
2	1	0,9	-	-	-
3	0,9	0,8	-	-	-

Si $A(l) \times a_1 < (4 - 0.002L)$ en KN/m^2 avec $L =$ longueur chargée en m, c'est $(4 - 0.002L)$ qui est pris en compte.

La surcharge $A_1 = A(l) \times a_1$ ou $(4 - 0.002L)$ est multiplié par le coefficient $a_2 = \frac{V_0}{V}$, V étant la largeur d'une voie, et les valeurs de V_0 sont données par le tableau suivant :

Tableau 14: Valeurs de V_0 [3]

Classe de pont	V_0 (m)
1	3,5
2	3
3	2,75

La charge $A_2 = a_1 a_2 A$ est appliquée uniformément sur toute la longueur de chacune des voies chargées :

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

$$A_2 = a_2 \times \text{Max} \left[a_1 \left(2.30 + \frac{360}{L + 12} \right); (4 - 0.002L) \right] \text{ en } KN/m^2 \text{ [3]}$$

Le tableau 15 récapitule les valeurs de A_2 pour différentes longueurs chargées :

Tableau 15: Valeurs de A(L)

Longueurs chargées L (m)	14.5 (travée 1 ou 4)	19.6 (travée 2 ou 3)	34.1 (travées 1+2)	39.2 (travées 2+3)	53.7 (travées 1+2+3)	68.2 (travées 1+2+3+4)
$A(l)$ en KN/m^2	16.4	13.69	10.65	9.28	8.14	7.3
a_1	1	1	1	1	1	1
$a_1 \times A(l)$ en KN/m^2	18.37	13.69	10.87	9.28	8.14	7.3
$(4 - 0.002L)$ en KN/m^2	3.97	3.96	3.94	3.92	3.9	3.88
a_2	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
$A_2(l)$ en KN/m^2	17.08	12.73	10.11	8.62	7.57	6.78

Remarque : la charge A simule une file de véhicules à l'arrêt sur le pont ou circulant à très faible vitesse. Nous chargerons le tablier pour chaque longueur utilisée dans le calcul de la charge A dans le but de rechercher les sollicitations maximales en travée et sur les appuis.

II.1.2.3. Système de charges B

Nous distinguons trois sous-systèmes :

- ✓ Bc (camion type)
- ✓ Bt (essieux tandem)
- ✓ Br (roue isolé)

Les sous-systèmes Bc et Br s'appliquent à tous les ponts, le sous-système Bt s'applique unique aux ponts de première classe.

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

a. Sous-système Bc

Ce sous-système se compose de deux camions de poids individuel égale à 300KN (30t) et nous disposons autant de files de deux camions au maximum que de voies de circulation.

D'après l'article 5 du Fascicule 61 Titre 2, l'axe de la roue la plus excentrée doit rester à une distance minimale du bord de la largeur roulable, égale à 0.25m dans le cas d'une bordure.

Un camion type Bc comporte trois essieux, tous trois à roues simples munies de pneumatiques, et répond aux caractéristiques suivantes (tableau 16) :

Tableau 16: Caractéristiques d'un camion Bc

Caractéristiques	Valeur	Unité
Masse totale	300	KN
Masse portée par chacun des essieux arrière	120	KN
Masse portée par l'essieu avant	60	KN
Longueur d'encombrement	10,5	m
Largeur d'encombrement	2,5	m
Distance des essieux arrière	1,5	m
Distance de l'essieu arrière au premier essieu avant	4,5	m
Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu	2	m
Surface d'impact d'une roue arrière	0,25x0,25	m ²
Surface d'impact d'une roue avant	0,2x0,2	m ²

La figure 11 est une représentation schématique du convoi Bc :

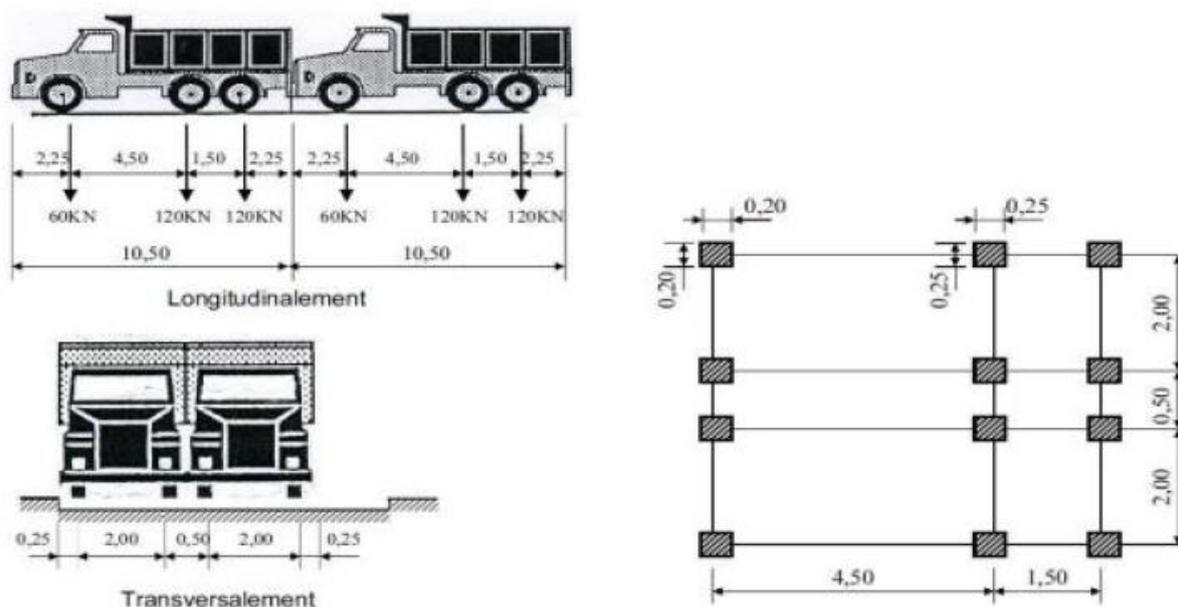


Figure 11: Représentation d'un convoi Bc [17]

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

Il est affecté aux charges du système Bc, un coefficient de pondération b_c (dégressivité transversale) donné par le tableau 17 :

Tableau 17: Valeurs du coefficient b_c [3]

Classe de pont	Nombre de voies chargées				
	1	2	3	4	5
1	1,2	1,1	0,95	0,8	0,7
2	1	1	-	-	-
3	0,98	0,98	-	-	-

b. Sous-système Bt

Un tandem du système Bt comporte deux essieux tous deux à roues simples munies de pneumatiques et répondant aux caractéristiques suivantes (tableau 18) :

Tableau 18: Caractéristiques d'un tandem Bt [3]

Caractéristiques	Valeur	Unité
Masse portée par chaque essieu	160	KN
Distance des deux essieux	1,35	m
Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu	2	m
Surface d'impact de chaque roue	0,25x0,6	cm ²

La figure 12 est une représentation schématique du convoi Bt :

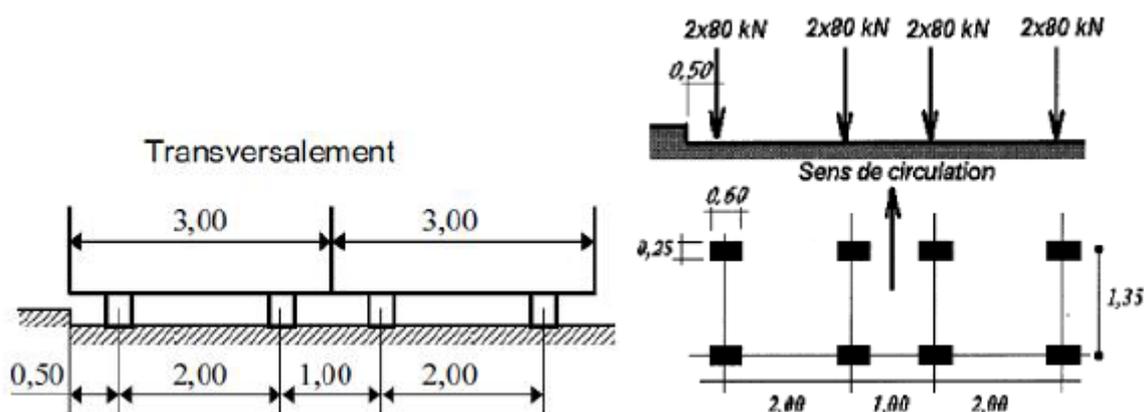


Figure 12: Représentation du convoi Bt [17]

D'après l'article 5 du Fascicule 61 Titre 2 du SETRA, pour le calcul du tablier, l'axe de la roue la plus excentrée doit rester à une distance minimale du bord de la largeur roulable, égale à 0.5 m s'il s'agit d'une bordure.

Le nombre de camion est limité à deux dans le sens transversal. En fonction de la classe de pont, les valeurs des charges du système Bt prises en compte sont multipliées par les coefficients suivants (tableau 19) :

Tableau 19: Valeurs du coefficient Bt [3]

Classe de pont	bt
1	1
2	0,9

c. Sous-système Br

Le système Br se compose d'une roue isolée transmettant une charge de 100 KN à travers une surface d'impact rectangulaire de 0.6x0.3 m² (la dimension 0.6, perpendiculaire à l'axe de déplacement des véhicules).

La figure 13 est une représentation schématique du convoi Br :

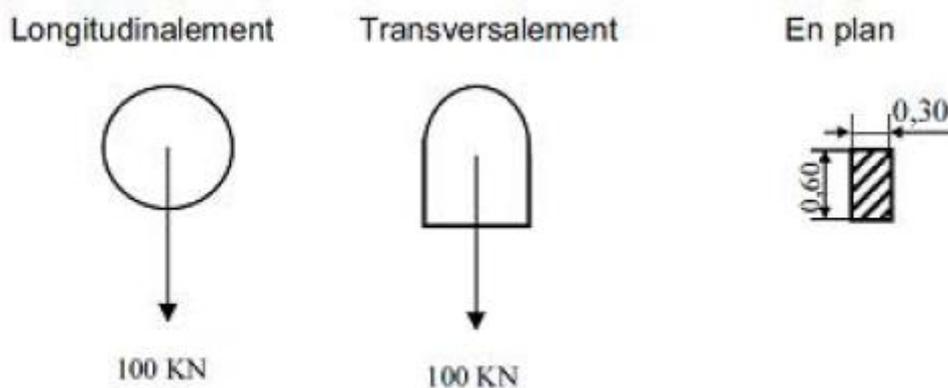


Figure 13: Représentation du système Br [17]

d. Coefficient de majoration dynamique (δ)

Qu'il s'agisse du sous-système Bc, Bt, ou Br, la charge de calcul vaut :

$$Q = \gamma_Q \cdot \delta \cdot b \cdot B$$

$$b = b_c \text{ ou } b_t \text{ selon les cas}$$

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

$$\delta = \text{coefficient de majoration dynamique} = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2L} + \frac{0.6}{1 + 4\frac{G}{S}} \quad [3]$$

$$L = \max(Lr; \text{portée de la travée})$$

G = Poids totale d'une section de couverture de longueur L et de toute la largeur relative à cette couverture et aux éléments reposant sur elle.

S = Poids total maximal des essieux su système B (B_c ou B_t) qu'il est possible de placer sur la longueur L .

Nous prendrons $\delta = \max(\delta_{Bc}; \delta_{Bt})$ pour toutes les charges du système B

➤ Calcul de G

Le calcul de G est récapitulé dans le tableau 20 :

Tableau 20: Calcul du poids propre du tablier

Désignation	Nombre	Dimension caractéristique	Poids caractéristique	Poids par ml
Dalle	1	Section $S=7.18 \text{ m}^2$	25KN/m3	179.5 KN/ml
Revêtement	1	Epaisseur $e= 0.06\text{m}$	24 KN/m3	10.8 KN/ml
		Largeur $l= 7.5\text{m}$		
Etanchéité	1	Epaisseur $e= 0.06\text{m}$	22 KN/m3	1.76 KN/ml
		Largeur $l= 10.2\text{m}$		
Corps de trottoir	2	Section $s=0.203\text{m}^2$	15 KN/m3	6.09 KN/ml
Bordure de trottoir	2	Section $s=0.0228\text{m}^2$	24 KN/m3	1.12 KN/ml
Corniche	2	Section $S= 0.19 \text{ m}^2$	25 KN/m3	9.5 KN/ml
Garde-corps N2	2	Longueur	0.48KN/ml	0.48KN/ml
Total	209.73 KN/ml			

➤ Calcul du coefficient de majoration dynamique

Nous avons calculé le coefficient de majoration dynamique pour la travée de rive et pour la travée intermédiaire dans le but de rechercher le maximum. Les calculs sont récapitulés dans les tableaux 21 et 22 :

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

Tableau 21: Calcul du coefficient de majoration dynamique pour la travée intermédiaire

Travée intermédiaire								
Système de charge	Nombre de file	bc ou bt	L (m)	S (KN)	G (KN)	G/S	$\frac{0.4}{1 + 0.2L}$	δ
Bc	1	1.2	19.6	720	4110.708	5.71	0.081	1.11
	2	1.1		1320		3.11		1.13
Bt	1	1		320		12.85		1.09
	2	1		640		6.43		1.1
Br	1	-		100		41.1		1.08

Tableau 22: Calcul du coefficient de majoration dynamique pour la travée de rive

Travée de rive								
Système de charge	Nombre de file	bc ou bt	L (m)	S (KN)	G (KN)	G/S	$\frac{0.4}{1 + 0.2L}$	δ
Bc	1	1.2	10.4	720	2181.2	3.03	0.13	1.175
	2	1.1		1320		1.65		1.2
Bt	1	1		320		6.82		1.15
	2	1		640		3.41		1.17
Br	1	-		100		21.81		1.1

Nous retenons ainsi pour le système B, un coefficient de majoration dynamique $\delta = 1.2$

II.1.2.4. Charges militaires : Convoi militaire Mc120

Le convoi Mc120 est un convoi qui se compose d'un groupe de deux essieux, assimilés à des rouleaux. Sa surface d'impact sur la chaussée est un rectangle uniformément chargé et qui ne développe ni force de freinage ni force centrifuge [3].

Ce convoi présente les caractéristiques suivantes (tableau 23) :

Tableau 23: Caractéristiques du convoi Mc 120 [3]

Caractéristiques	Valeur	Unité
Masse totale	1100	KN
Longueur d'une chenille	6,1	m
Largeur d'une chenille	1	m
Distance d'axe en axe de deux chenilles	3,3	m

La figure 14 est une représentation schématique du convoi militaire Mc120 :

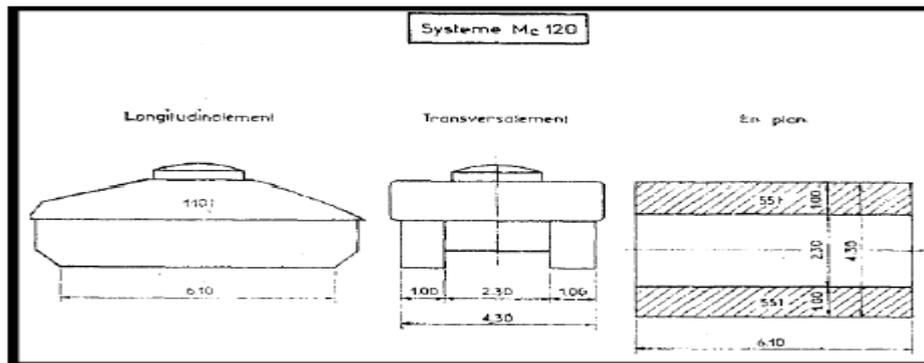


Figure 14: Représentation du convoi militaire Mc 120 [2]

Transversalement, un seul convoi du système Mc est supposé circuler quel que soit la largeur de la chaussée.

Longitudinalement, le nombre de véhicules du convoi n'est pas limité et la distance de deux véhicules successifs est déterminée pour produire l'effet le plus défavorable, la distance libre entre leurs points de contact avec la chaussée devant être au moins égale à 30.5m.

Les impacts des chenilles sur la chaussée sont disposés parallèlement à l'axe de celle-ci et peuvent être disposés sur toute la largeur chargeable, sans pouvoir empiéter sur les bandes de 0.5 m réservées le long des dispositifs de sécurité.

Le coefficient de majoration dynamique applicable à ce modèle de charge est calculé par la même formule que celle du système B, et récapitulé dans le tableau 24 :

Tableau 24: Calcul du coefficient de majoration dynamique du système Mc 120

Travée	Nombre de file	L (m)	S (KN)	G (KN)	G/S	$\frac{0.4}{1+0.2L}$	δ
Intermédiaire	1	19.6	1100	4110.708	3.74	0.0813	1.12
De rive	1	10.4	1100	2181.2	1.98	0.13	1.2

Nous retenons donc pour ce système, un coefficient de majoration dynamique $\delta = 1.2$

II.1.2.5. Charges de trottoir

Les charges de trottoir sont divisées en deux systèmes.

a. Système de charges locales

Ce système est utilisé lors de la justification transversale du tablier. Il comprend :

➤ Une charge uniforme de 4.5KN/m^2 , supportée par le trottoir, dont les effets peuvent se cumuler avec ceux du système B ou des charges militaires.

➤ Sur les trottoirs en bordure de chaussée, il y a lieu de disposer dans la position la plus défavorable pour l'élément considéré une roue isolée de 60KN dont la surface d'impact est un carré de 0.25m de côté. Les effets de la roue ne se cumulent pas avec ceux des autres charges de chaussée ou de trottoir. Ils sont à prendre en compte uniquement lorsqu'il s'agit d'état limite ultime [3].

b. Charges générales

Ce système de charge est utilisé lors de la justification longitudinale du tablier, la charge occupe toute la largeur des trottoirs et longitudinalement, elle est disposée de manière à produire l'effet le plus défavorable. Cette charge a pour densité surfacique 1.5KN/m^2 .

Dans le sens de la largeur, chaque trottoir est chargé dans sa totalité, mais les deux peuvent ne pas être chargées simultanément.

Pour leur prise en compte dans les justifications vis-à-vis des états limites ultimes, les charges générales de trottoir sont traitées comme les charges A et B [3].

II.1.2.5. Effets thermiques

Les effets thermiques sont évalués conformément aux prescriptions du Fascicule 62 Titre 1. Ces effets comprennent les variations uniformes de température ainsi que le gradient thermique. Pour prendre en compte ces effets dans le logiciel, nous avons défini la variation de température dT tel que décrit dans l'Eurocode 1 Section 5, ainsi que le gradient thermique Θ . Nous avons ainsi obtenu $dT = 1$, et le gradient thermique est pris égal à 5^0 selon les prescriptions du Fascicule 62 Titre 1 du SETRA.

II.1.2.5. Application des charges roulantes sur la dalle

Pour appliquer les charges roulantes sur la dalle à l'aide du logiciel, nous procédons de la manière suivante :

La partie de la roue en contact avec la surface du tablier exerce une charge Q sur une surface d'impact $S = a_0 \times b_0$. L'effet de diffusion de la charge à 45^0 sous cette roue engendre au niveau du feuillet moyen (ligne neutre) de la dalle, une charge Q' sur une surface d'impact $S' = a \times b$, tel qu'illustré sur la figure 15.

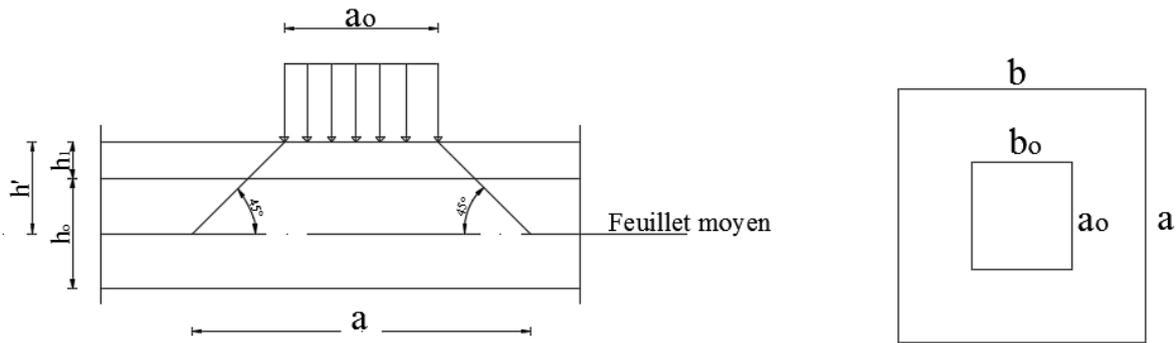


Figure 15: Diffusion des charges dans la dalle

Nous avons alors :

$$a = 2h' + a_0 ; b = 2h' + b_0 \text{ Avec } h' = \frac{h_0}{2} + h_1$$

Chaque charge est multipliée par son coefficient de majoration dynamique.

a. Système Bc

Pour les charges du système Bc,

➤ Les roues des essieux arrière transmettent chacune une charge $Q = 60KN$ sur une surface d'impact $S = 0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$, ce qui nous donne $Q' = (Q \times b_c \times \delta) / S' = 59.88KN$ sur une surface $S' = 1.15 \times 1.15 \text{ m}^2$.

➤ Les roues de l'essieu avant transmettent chacune une charge $Q = 30KN$ sur une surface d'impact $S = 0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$, ce qui nous donne $Q' = (Q \times b_c \times \delta) / S' = 32.73KN$ sur une surface $S' = 1.1 \times 1.1 \text{ m}^2$.

Après plusieurs simulations, le système Bc est plus contraignant lorsque nous disposons deux files de deux camions accolés à 25cm du bord du trottoir.

b. Système Bt

Les roues des essieux du système Bt transmettent chacune une charge $Q = 80KN$ sur une surface d'impact $S = 0.25 \times 0.6 \text{ m}^2$, nous avons alors $Q' = (Q \times b_t \times \delta) / S' = 55.65KN$ sur une surface $S' = 1.15 \times 1.5 \text{ m}^2$.

Le système Bt est plus contraignant lorsque nous disposons deux tandems accolés sur l'axe du tablier.

c. Système Br

Le système Br est une roue isolée qui transmet une charge $Q = 100KN$ sur une surface d'impact $S = 0.3 \times 0.6 m^2$, ce qui nous donne $Q' = (Q \times \delta) / S' = 66.67KN$ sur une surface $S' = 1.2 \times 1.5 m^2$.

Le système Br est plus contraignant lorsque la roue isolée circule sur l'axe du tablier.

d. Surcharge militaire Mc 120

Chacune des chenilles du convoi Mc 120 transmet une charge $Q = 550KN$ sur une surface d'impact $S = 1 \times 6.1 m^2$, ce qui nous donne $Q' = (Q \times \delta) / S' = 49.6KN$ sur une surface $S' = 1.9 \times 7 m^2$.

Le système Mc 120 est plus contraignant lorsque nous disposons deux camions distants de 30.5m sur l'axe du pont.

e. Charges de trottoir

Nous distinguons :

➤ **Charges générales**

La charge que nous notons « Foule 1 » est une charge uniformément répartie sur les trottoirs avec une intensité $Q=1.5KN/m^2$. Cette charge intervient uniquement pour la justification à l'état limite Ultime.

➤ **Charges locales**

Ces charges comprennent :

- La charge que nous notons « Foule 2 » d'intensité $Q= 4.5 KN/m^2$. Cette charge est prise en compte pour le calcul de tous les éléments des couvertures et des tabliers. Après simulations, l'effet maximal envisagé est produit lorsque les deux trottoirs sont chargés sur toutes leurs longueurs. Cette charge est cumulable avec celles du système B.
- Une roue isolée qui porte une charge $Q = 60KN$ sur une surface d'impact $S = 0.25 \times 0.25 m^2$, ce qui nous donne $Q' = 45.36KN$ sur une surface $S' = 1.15 \times 1.15 m^2$ appliquée uniquement à l'Etat Limite Ultime, et dont les effets ne se cumulent pas avec ceux des autres charges.

II.2. Combinaisons d'actions

Le Fascicule 61 Titre 2, le Fascicule 61 Titre 1 et le B.A.E.L 91 nous permettent de regrouper dans le tableau 25, les valeurs des coefficients à prendre en compte dans les différentes combinaisons.

Tableau 25: Pondération des charges en fonction des Etats limites

Etat limite	ELU			ELS		
	Coefficient pour valeur nominale	Coefficient du B.A.E.L	Produit	Coefficient pour valeur nominale	Coefficient du B.A.E.L	Produit
Gmax		1,35	1,35		1	1
Gmin		1	1		1	1
Trottoir	1,07	1,5	1,605	1	1	1
A(L)	1,07	1,5	1,605	1,2	1	1,2
Bc, Bt, Br	1,07	1,5	1,605	1,2	1	1,2
M, D,E	1	1,35	1,35	1	1	1

Les différentes combinaisons fondamentales à prendre en compte sont regroupées dans les tableaux 26 et 27 :

➤ Aux Etats Limites Ultimes :

Tableau 26: Combinions à prendre en compte à l'ELU [4].

Situation	Actions permanentes ou assimilées $1,35 G_{max} + G_{min}$	Actions variables	
		de base $\gamma_{Q1} Q_1$ (1)	d'accompagnement $1,3 \psi_{02} Q_2$
d'exécution	$1,35 G$ ou G + $1,35 Q_{prc}$ ou Q_{prc}	$1,5 Q_{prc}$	0 ou $1,3 W$
		$1,5 W$	0 ou $1,3 Q_{prc}$
d'exploitation	$1,35 G$ ou G	$1,5 Q_t$	0
		$1,35 Q_p$ (2)	0
		$1,5 W$	0

NB : La température ne figure pas dans le présent tableau, car elle n'est généralement pas à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'Etat Limite Ultime. Cependant, lorsqu'il y a lieu de la considérer en tant qu'action de base, il est rappelé qu'elle doit être introduite avec un coefficient 1.35 [4].

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

➤ Aux Etats Limites de Service

Les combinaisons à prendre en compte à l'état limite de service sont les suivantes :

Tableau 27: Combinaisons à prendre en compte à l'ELS [4].

Situation	Actions permanentes ou assimilées $G_{max} + G_{min}$	Actions variables	
		de base Q_1	d'accompagnement $\psi_{02} Q_2$
d'exécution	$G + Q_{prc}$	Q_{pra}	0 ou W
		W	0 ou Q_{pra}
		$\Delta\theta$ ou T	0 ou Q_{pra}
d'exploitation	G	Q_r	0 ou 0,5 $\Delta\theta$ ou 0,6 T
		Q_p (1)	0
		$\Delta\theta$ ou T	0
		W	0

(1) Même remarque qu'en D.2.1.1. pour les convois exceptionnels.

Où,

G : charges permanentes

Q_{prc} : charges d'exécutions connues (en grandeur et position)

Q_{pra} : charges d'exécutions aléatoires

Q_r : charges d'exploitation des ponts routes sans caractère particulier (système A et B avec leurs effets annexes, charges de trottoir)

Q_{rp} : charges d'exploitation des ponts routes de caractère particulier (convois militaires ou exceptionnels)

W : action du vent

T : variations uniformes de la température

$\Delta\theta$: gradient thermique

S_n : action de la neige.

Remarque : Dans le cas du présent projet, les charges d'exécution connues, les charges d'exécutions aléatoires, les charges d'exploitation des ponts-routes de caractère particulier, les actions du vent et l'action de la neige ne sont pas prises en compte.

II.3. Vérification du poinçonnement de la dalle

Il y a lieu de vérifier la résistance de la dalle au poinçonnement sous l'effet des charges localisées [4].

Cette vérification s'effectue comme suit :

$$Q_u \leq Q_v = 0.045 U_c h f_{cj} / \varphi_b \quad [4]$$

Dans cette expression,

Q_u = La charge de calcul vis-à-vis de l'ELU

h = Épaisseur totale de la dalle

U_c = Périmètre du contour au niveau du feuillet moyen défini à l'article A.3.2.5 du BAEL 91 révisé 99

Nous avons : $U_c = 2(a + b)$ et $Q_u = 1.065 \times Q_{bc, bt \text{ ou } br} \times \delta$

Le calcul est automatisé et les résultats sont consignés dans le tableau 28 :

Tableau 28: Vérification du poinçonnement de la dalle

Roue	Br	Bt	Bc	Unité
Charge Q'	66,7	55,65	59,84	KN
Coef ELU	1,605	1,605	1,605	
QU	107,05	89,32	96,04	KN
H	0,75	0,75	0,75	M
A	1,5	1,5	1,15	M
B	1,2	1,15	1,15	M
Uc	5,4	5,3	4,6	M
Qv	4252,5	4173,75	3622,5	KN
Conclusion	OK	OK	OK	

Notre dalle n'est donc pas sujette au poinçonnement.

II.4. Résultats de l'étude du tablier

Nous présentons ici les sollicitations maximales ainsi que le résultat du calcul du ferrailage du tablier. Nous rappelons que la note de l'étude complète est jointe en annexe 4 du présent document.

Le modèle de calcul du tablier est représenté sur la figure 16 :

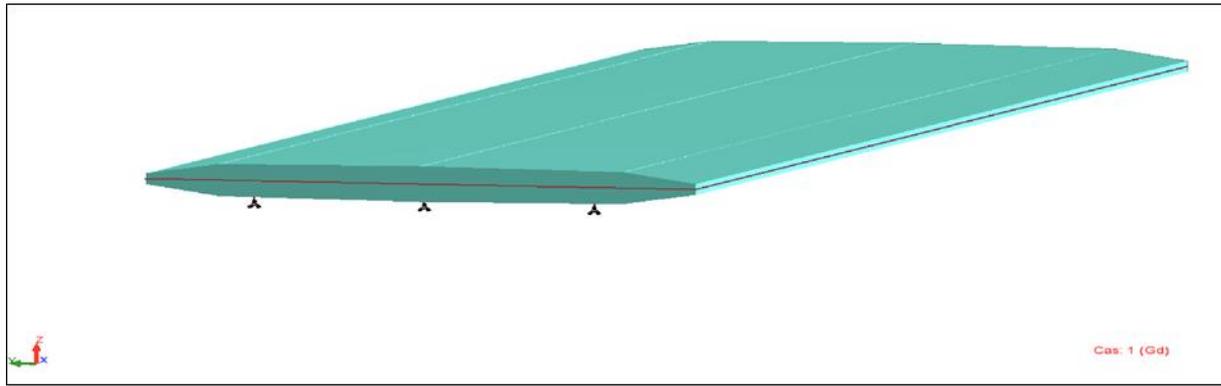


Figure 16: Modèle de calcul du tablier

II.4.1. Résultat du calcul des sollicitations sur le tablier

Les sollicitations maximales obtenues sont consignées dans le tableau 29 :

Tableau 29: Valeur des sollicitations dues aux charges sur le tablier

Effort		Valeur	Unité
Moments	Mxx	950.83	KNm/m
	Myy	1676.38	KNm/m
	Mxy	401.09	KNm/m
Efforts tranchants	Qxx	1081.16	KN/m
	Tyy	1471.68	KN/m

II.4.2. Résultat du calcul du ferrailage du tablier

Les sections d'armatures maximales théoriques calculées sur la base des sollicitations précédentes sont consignées dans le tableau 30 :

Tableau 30: Sections d'armatures théoriques

Direction		Valeur	Unité
Principale	Ax(-)	68.26	cm ² /m
	Ax(+)	105.23	cm ² /m
Perpendiculaire	Ay(-)	13.5	cm ² /m
	Ay(+)	51.24	cm ² /m

Nous rappelons que la note de calcul complète ainsi que le détail du calcul du ferrailage figurent en annexe 4.

III. Etude de la pile centrale et de la semelle de liaison

Les piles constituent les appuis intermédiaires du tablier du pont, elles sont soumises à la fois à des actions verticales et horizontales, ce qui donne naissance à des sollicitations importantes à leurs base.

La pile centrale est constituée d'un voile de 7.5 m de longueur, 0.7 m de largeur et 7 m de hauteur, transmettant les efforts aux pieux par l'intermédiaire d'une semelle de liaison de 9.6 m de longueur, 2.4 m de largeur, et 1.5 m de hauteur.

Le modèle de calcul de la pile et de la semelle de liaison est représenté sur la figure 17 :

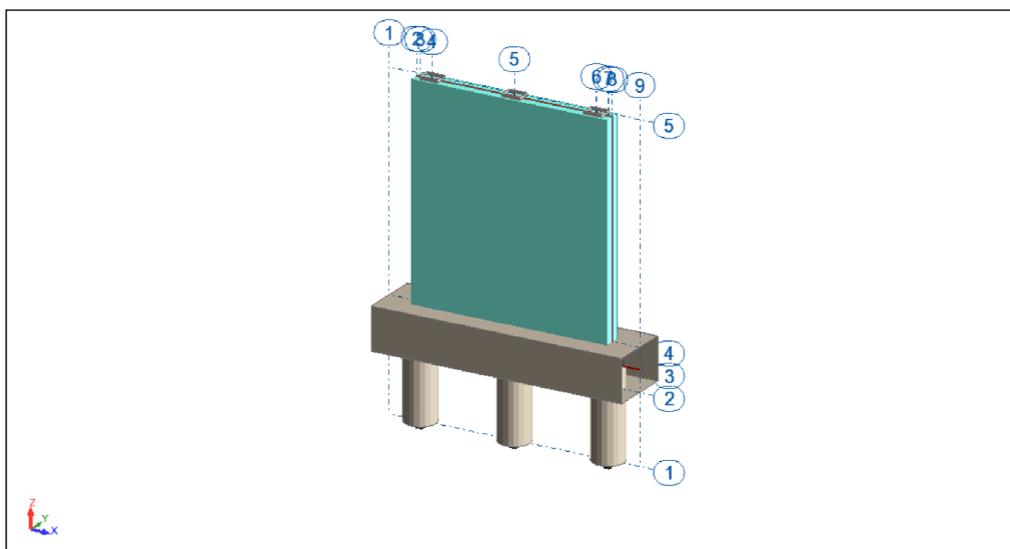


Figure 17: Modèle de calcul de la pile centrale

III.1. Les charges appliquées à la pile

Nous distinguons :

- Les actions provenant de la pile : il s'agit du poids propre de la pile.
- Les actions provenant du tablier : elles se décomposent en actions verticales et horizontales.
 - Les actions verticales sont les réactions d'appui issues de l'étude de la flexion longitudinale du tablier.
 - Les actions horizontales issues du tablier à prendre en compte dans le calcul des piles sont les actions de freinage due à la charge A ou Bc.

Les actions maximales issues du tablier sont les suivantes (tableau 31) :

Tableau 31: Charges transmises à la pile par le tablier

Charges	Fx (en KN)	Fy (en KN)	Fz (en KN)
Poids propre du tablier Max	22,2	49,31	-1451,21
Poids propre du tablier Min	19,32	46,1	-1325,83
A(L)	15,88	23	-458,91
Bc	58,72	74,8	-732,67
Bt	32,69	44,94	-481,91
Br	8,35	8,7	-103,1
MC120	57,15	91,69	-740,1
Foule	9,1	19,86	-104,48
Roue sur trottoir	12,05	12,05	-81,21
Freinage A(L)	-	4,2	-
Freinage Bc	-	20	-

III.2. Combinaisons d'actions

Les combinaisons d'actions pour le calcul de la pile et la semelle de liaison sont les suivantes :

- A l'état limite ultime

$$1.35G_{max} + G_{min} + 1.35T + \begin{cases} 1.605Qr + 1.605F_{QR} \\ 1.35Q_{rp} \end{cases}$$

- A l'état limite de service

$$G_{max} + G_{min} + 0.6T + \begin{cases} 1.2Qr + 1.2F_{QR} \\ Q_{rp} \end{cases}$$

Où :

G_{max} : l'ensemble des actions permanentes défavorables

G_{min} : l'ensemble des actions permanentes favorables

Qr : surcharge active routière sans caractère particulier (A, B et trottoir)

Q_{rp} : surcharge active routière à caractère particulier (MC120)

F_{QR} : Force de freinage du système Bc ou A

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

Le tableau de combinaison complet est donné dans la note de calcul complète en Annexe 5 du présent document.

III.3. Résultats de l'étude de la pile centrale et de la semelle de liaison

III.3.1. Résultats du calcul des sollicitations sur le voile de la pile

Les sollicitations maximales obtenues sont consignées dans le tableau 32 :

Tableau 32: Sollicitation maximales dues aux charges appliquées sur le voile de la pile centrale

Effort		Valeur	Unité
Efforts de membrane	Nxx	1859,12	KN
	Nyy	5717,97	KN
	Nxy	1869,33	KN
Moments	Mxx	190,61	KNm/m
	Myy	1010,39	KNm/m
	Mxy	126,05	KNm/m
Efforts tranchants	Qxx	292,43	KN/m
	Qyy	288,01	KN/m

III.3.2. Résultats du calcul du ferrailage du voile de la pile

Le calcul du Ferrailage nous a donné les résultats suivants (tableau 33) :

Tableau 33: Résultats du calcul du ferrailage du voile de la pile

Armatures verticales	Armatures horizontales	Frettes de surface	Armatures de chaînage	Armatures d'éclatement	
105	5,37	3,35	20,9	Parallèle à la ligne d'appui	Perpendiculaire à la ligne d'appui
				12,5	12,5
cm ²	cm ² /m	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²

III.3.3. Résultats du calcul des sollicitations sur la semelle de liaison

Les sollicitations sur la semelle de liaison sont représentées sur la figure 18 :

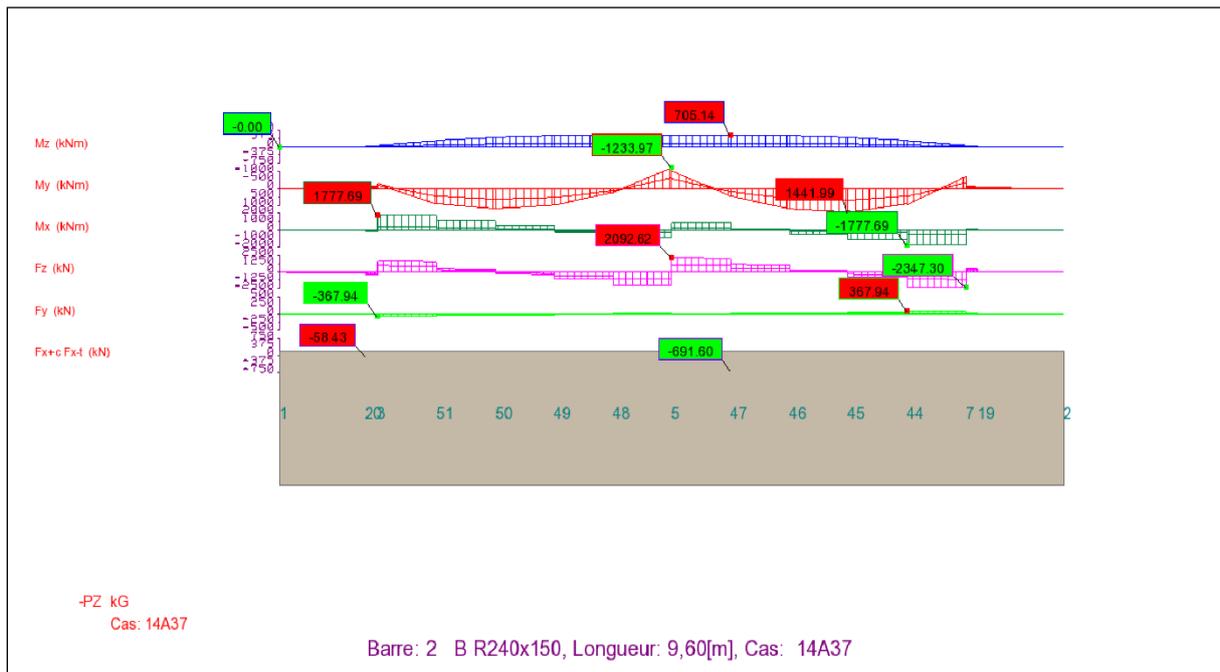


Figure 18: sollicitations au niveau de la semelle de liaison

III.3.4. Résultats du calcul du ferrailage de la semelle de liaison

Le calcul du Ferrailage à l'aide du logiciel nous a donné les résultats suivants (tableau 34) :

Tableau 34: Résultats du calcul du ferrailage de la semelle de liaison

Ferrailage théorique supérieur (en cm ² /m)	Ferrailage théorique inférieur (en cm ² /m)
72.66	72.66

Nous rappelons que l'étude complète de la pile centrale est jointe en annexe 5 du présent document.

IV. Etude de la culée de l'ouvrage

Il s'agit d'une culée enterrée reposant sur des fûts circulaires de 1.2 m de diamètre, par l'intermédiaire d'un sommier d'appui de 10.2m de longueur, 1.5 m de largeur et 1 m de hauteur.

Nous rappelons que les culées enterrées sont des culées dont la structure porteuse est noyée dans le remblai d'accès à l'ouvrage. Elles assurent essentiellement une fonction porteuse car elles sont peu sollicitées par les poussées de terres, hors mis celles s'exerçant sur le mur garde-grève, raison pour laquelle il n'est pas nécessaire d'effectuer une vérification de leurs stabilités interne et externe.

IV.1. Le corbeau d'appui

Les caractéristiques géométriques du corbeau d'appui de la dalle de transition étant identiques à celles figurant sur la culée type du SETRA, pour son ferrailage, nous nous référons au ferrailage type proposé dans le dossier 1.3.2 « Calculs complémentaires – Ferrailages types » du PP73.

IV.2. Le mur garde-grève

Le mur garde-grève a une hauteur maximale $h = 1.15m$ et une épaisseur $e = 0.3m$. Il est soumis à des forces verticales et horizontales qui produisent des efforts de flexion et de cisaillement dont les valeurs maximales ont lieu au niveau de la section d'encastrement dans le chevetre (sommier d'appui). Ces efforts sont regroupés en efforts verticaux et horizontaux [7].

Les efforts verticaux comprennent :

- Le poids propre du mur ;
- La réaction d'une charge directement appliquée sur le mur garde-grève ;
- La réaction de la dalle de transition.

Les efforts horizontaux comprennent :

- Les poussées des terres ;
- La poussée d'une charge locale située à l'arrière du mur ;
- La force de freinage d'un essieu lourd Bc.

D'après le PP73, dans le dossier 1.3.2 « calculs complémentaires – Ferrailages types », le calcul du mur garde-grève ne peut être dissocié de l'environnement de ce dernier : structure de chaussée, conditions de remblaiement, de sorte que toutes les hypothèses de calcul restent incertaines. C'est ainsi que dans les cas courants, nous pourrions nous contenter d'utiliser un ferrailage type et nous dispenser de tout calcul sur les murs garde-grève [7].

Pour notre mur, le ferrailage type prévoit :

- **Ferrailage vertical**

- Sur la face arrière :

$\emptyset 14HA$ tous les 0.14m

- Sur la face avant : espacement doublé

$\emptyset 14HA$ tous les 0.28m

➤ **Ferraillage horizontal**

Ø10HA tous les 0.15m sur les deux faces.

IV.3. Murets-caches

Quel que soit le type de culée, on dispose généralement des murets-caches aux extrémités latérales des têtes de culées. Ils permettent de protéger les appareils d'appuis des terres lorsque la trace du remblai extérieur recoupe la partie basse du tablier. Par ailleurs, ces murets ont une fonction esthétique, car à cause des coulures d'eau, les abouts des tabliers sont assez disgracieux. Il s'agit de murs d'une vingtaine de centimètre d'épaisseur réalisé en béton banché ou en parpaings [2].

Nous notons tout de même qu'ils ont une fonction mécanique, même s'ils ne sont pas pris en compte dans les calculs.

IV.4. Mur en retour

Situés de part et d'autre du mur garde-grève, les murs en retour ont pour rôle de retenir latéralement les terres du remblai d'accès. Ils se comportent donc comme des ouvrages de soutènement. Pour assurer la reprise des efforts appliqués sur le mur en retour, le dossier 1.3.2 « Calculs complémentaires – Ferraillages types » du PP73 du SETRA, préconise, pour un mur de 4m de longueur théorique et 0.3m d'épaisseur et un moment d'axe vertical d'environ 17t.m, le ferraillage type suivant :

- 5HA 20 répartis sur le quart supérieur de la hauteur d'attache h_1
- 5HA 20 répartis sur la hauteur restante
- Sur les deux faces et dans les deux directions, horizontale et verticales, il doit être placé une section d'armature au moins égale à $2\text{cm}^2/\text{ml}$; ces armatures sont constituées de cadres.

IV.5. Sommier d'appui

L'étude du sommier d'appui est menée conformément aux prescriptions de la pièce 1.3.2 du PP 73 du SETRA.

Le sommier d'appui est soumis en plus de son poids propre, à des actions provenant du mur garde-grève, des murs en retour, de la dalle de transition et du tablier. Les sollicitations correspondantes se traduisent par des moments de flexion, des efforts tranchants et des moments de torsion, ces derniers étant produits par les charges excentrées et certains efforts horizontaux (freinage et poussée d'une charge sur le mur garde-grève) [7].

Le dimensionnement du sommier d'appui à l'aide du logiciel RSA est fait selon le modèle représenté sur la figure 19 :

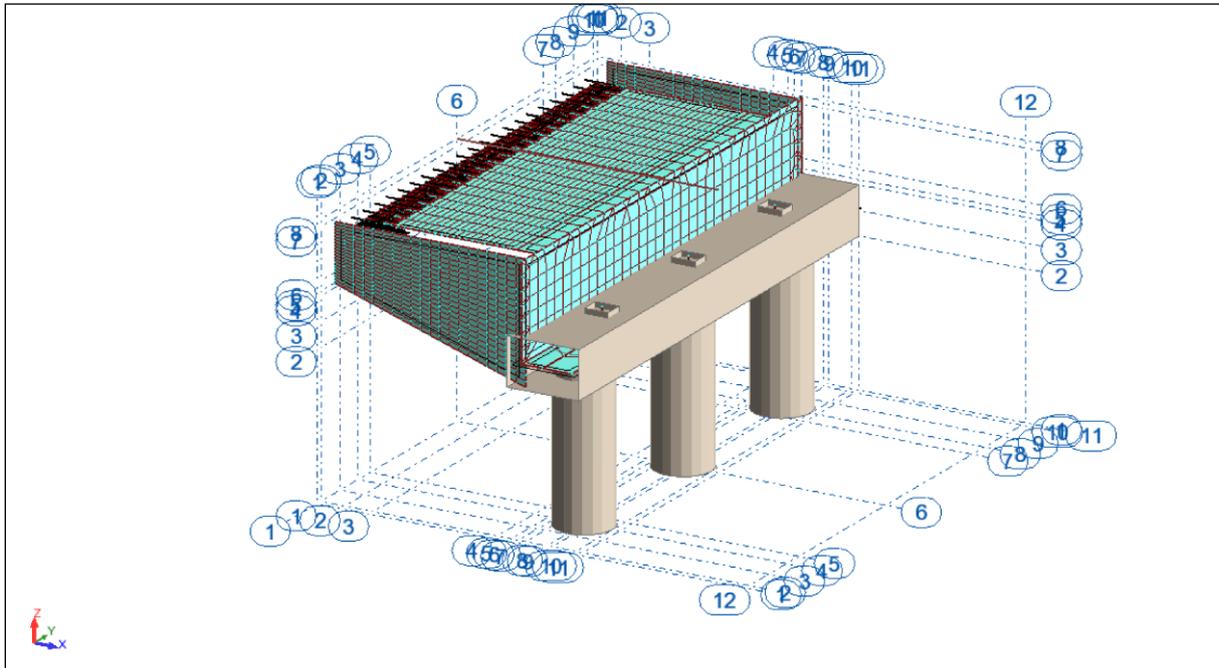


Figure 19: Modèle de calcul de la culée

IV.5.1. Charges appliquées au modèle

Les charges appliquées à ce modèle sont les suivantes :

➤ **Poids propres de la structure (culée)**

Le poids propre de la structure est pris en compte automatiquement par le logiciel.

➤ **Charges transmises par le tablier**

Ces charges sont consignées dans le tableau 35 :

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

Tableau 35: Charges transmises à la culée par le tablier

Charges	Fx en (KN)	Fy en (KN)	Fz en (KN)	Réactions d'appui maximales dû aux charges et surcharges du tablier
Poids propre du tablier (min)	-	-	-417,01	
A(L)	-	-	-171,71	
Bc	-	-	-451,8	
Bt	-	-	-372,44	
Br	-	-	-98,24	
Mc120	-	-	-454,92	
Foule	-	-	-42,9	
Roue isolée sur trottoir	-	-	-76,28	
Freinage de A(L)	-	4,2	-	
Freinage de Bc	-	20	-	
Température	-	-	-183,92	

➤ Poussée des terres sur le mur garde grève et les murs en retour

La poussée des terres varie en fonction de la hauteur et est donnée par la formule suivante :

$$P_t = \gamma \times K_{amax} \times h, \text{ où } \gamma = 20 \text{KN/m}^3 \text{ et } K_{amax} = 0.55$$

Tableau 36: Valeurs des poussées des terres sur la culée

Hauteur (en m)	Valeur de la poussée (en KN/m ²)
0	0
1	11
2	22
2,5	27.5

➤ Charges roulantes sur la dalle de transition

D'après la pièce 1.3.2 du PP73 du SETRA, les charges roulantes à prendre en compte sur la dalle de transition pour le calcul du sommier d'appui sont uniquement celles des systèmes Bc et Bt.

IV.5.2. Combinaisons d'actions

Pour le calcul du sommier d'appui, les combinaisons fondamentales sont les suivantes :

- A L'état limite ultime

$$1.35G_{max} + G_{min} + 1.35T + \begin{cases} 1.605Qr + 1.605F_{QR} \\ 1.35Q_{rp} \end{cases}$$

- A l'état limite de service

$$G_{max} + G_{min} + 0.6T + \begin{cases} 1.2Qr + 1.2F_{QR} \\ Q_{rp} \end{cases}$$

Où :

G_{max} : l'ensemble des actions permanentes défavorables

G_{min} : l'ensemble des actions permanentes favorables

Qr : surcharge active routière sans caractère particulier (A, B et trottoir)

Q_{rp} : surcharge active routière à caractère particulier (MC120)

F_{QR} : Force de freinage du système Bc ou A

IV.5.3. Résultats du calcul des sollicitations sur le sommier d'appui

Les sollicitations sur le sommier d'appui sont représentées sur la cartographie suivante (figure 20) :

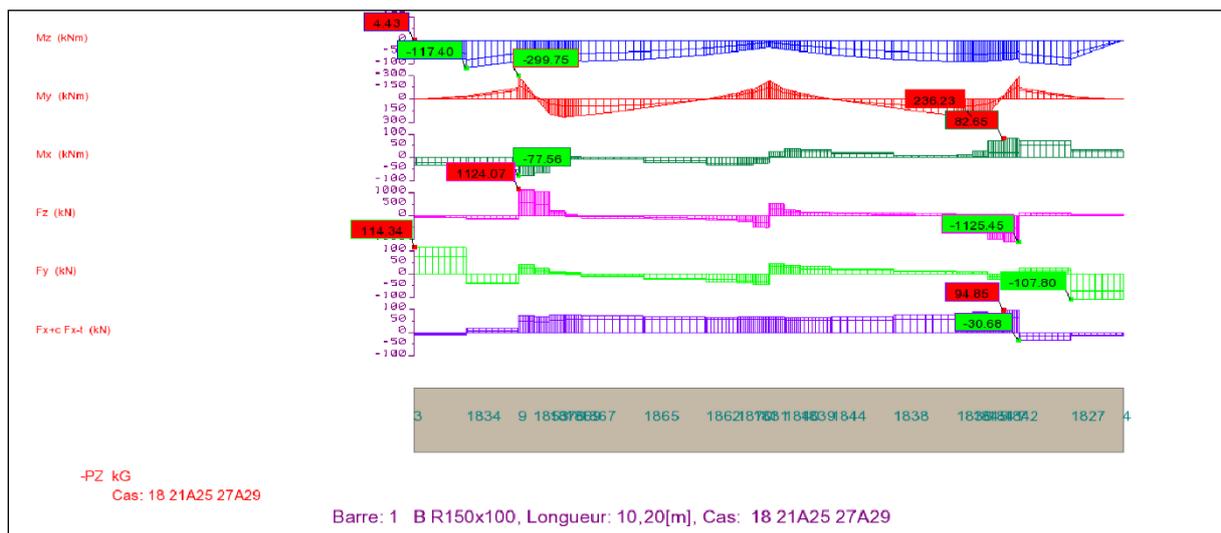


Figure 20: Cartographie des efforts sur le sommier d'appui

IV.5.3. Résultat du calcul du ferrailage du sommier d'appui

Le calcul du ferrailage du sommier d'appui à l'aide du logiciel nous donne les résultats suivants (tableau 37) :

Tableau 37: Résultats du calcul du ferrailage du sommier d'appui

Ferrailage théorique supérieur (en cm²/m)	Ferrailage théorique inférieur (en cm²/m)
23,14	23,14

Nous rappelons que la note de calcul de calcul complète de la culée est jointe en annexe 5 du présent document.

V. ETUDE DES FONDATIONS PROFONDES

Dans le cadre de notre projet, l'étude des fondations profondes a été menée par le Bureau de Recherche d'Etudes et de Contrôle Géotechnique (BRECG). Cette étude conclut, pour notre ouvrage, à la mise en place des pieux forés à la boue de 1.2m de diamètre et hauteurs 12m et 17 m respectivement pour les culées et les piles.

Ces pieux sont réalisés à la suite des forages exécutés dans le sol par des moyens mécaniques (tarière, benne, ...) sous protection d'une boue de forage. Il s'agit de fondations de section importante, donc de capacité portante élevée. Le forage est rempli de béton de grande ouvrabilité dont La mise en œuvre se fait selon la technique du tube plongeur, au moyen d'une colonne de bétonnage. Cette colonne est un tube métallique constitué de plusieurs éléments et surmonté d'un entonnoir ou goulotte. La boue de forage se compose d'eau, de bentonite, et éventuellement d'argile de ciment et d'additifs. Elle doit être adaptée au maintien de la stabilité des parois du forage pendant son exécution et jusqu'à la fin du bétonnage, et permettre un bétonnage correct. Chaque pieu sera équipé de trois tubes d'auscultation sonique.

L'étude des pieux s'effectue en général en deux étapes :

V.1. L'étude de la portance

Elle commence toujours par une étude géotechnique du sol (détermination de sa nature, son module de Young, ...). Pour ce faire, on utilise un pénétromètre pour réaliser des sondages préssiométriques. On mesure alors la résistance à la pénétration du sol, c'est-à-dire la résistance de pointe et les frottements latéraux. Nous rappelons que les résultats de cette étude sont fournis en annexe 3.

V.2. Le dimensionnement interne

La résistance du pieu aux sollicitations interne dépend fortement de la nature du sol, d'où l'intérêt des essais de pénétration effectués pour la portance. Nous allons ainsi effectuer le dimensionnement d'un pieu sous la pile centrale, qui constitue l'appui prépondérant de notre ouvrage, et nous appliquerons son ferrailage à tous les autres pieux, y compris aux fûts des culées.

V.2.1. Hypothèses et bases de calcul

V.2.1.1. Normes et règlements

Le dimensionnement interne des pieux est mené conformément aux prescriptions des normes et règlements suivants :

- SETRA : Piles et Palées (PP73)
- Fascicule 61 – Titre II : Programme de charge et épreuve des ponts-routes.
- Fascicule 62 – Titre 1 – Section 1 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages en béton armé suivant la méthode des états limites – BAEL 91 Révisé 99.
- Fascicule 62 – Titre 5 : Règles de conception et de calcul des fondations des ouvrages de Génie Civil.
- BAEL 91 révisé 99 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites.
- Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – partie 3 : Structures de fondations.

V.2.1.2. Caractéristiques des matériaux

Le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) prescrit l'utilisation des matériaux dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Béton **B30** ;
- Ciment Portland CPA – CEMI 42.5 ;
- Granulat de Coefficient de Los Angeles < 30 ; $d/D = d/25$;
- Nuance des armatures rondes lisses : Fe E 235 ;
- Nuance des armatures HA : Fe E 400 ;

V.2.1.3. Modèle de calcul

L'un des paramètres fondamentaux de la modélisation des pieux est la prise en compte des caractéristiques du sol. En effet, les pieux sont supposés encastrés dans le sol (effet du facteur de pointe) et subissant latéralement des réactions élastiques. Pour tenir compte de cette interaction sol pieux, nous avons modélisé le système de fondation en simulant les pieux à des barres appuyées latéralement par des appuis élastiques ayant les rigidités des couches de sol.

Les rigidités linéiques sont évaluées sur la base des résultats des essais préssiométriques à l'aide de la formule suivante :

$$K = \frac{12E_m}{\frac{4}{3}[2.65]^\alpha + \alpha} \quad [5]$$

Avec :

E_m : Module préssiométrique de Menard

α : Coefficient rhéologique dépendant de la nature et des propriétés du sol

Les valeurs de E_m α .et K sont données en annexe 3

Le modèle de calcul des pieux est représenté sur la figure 21 :

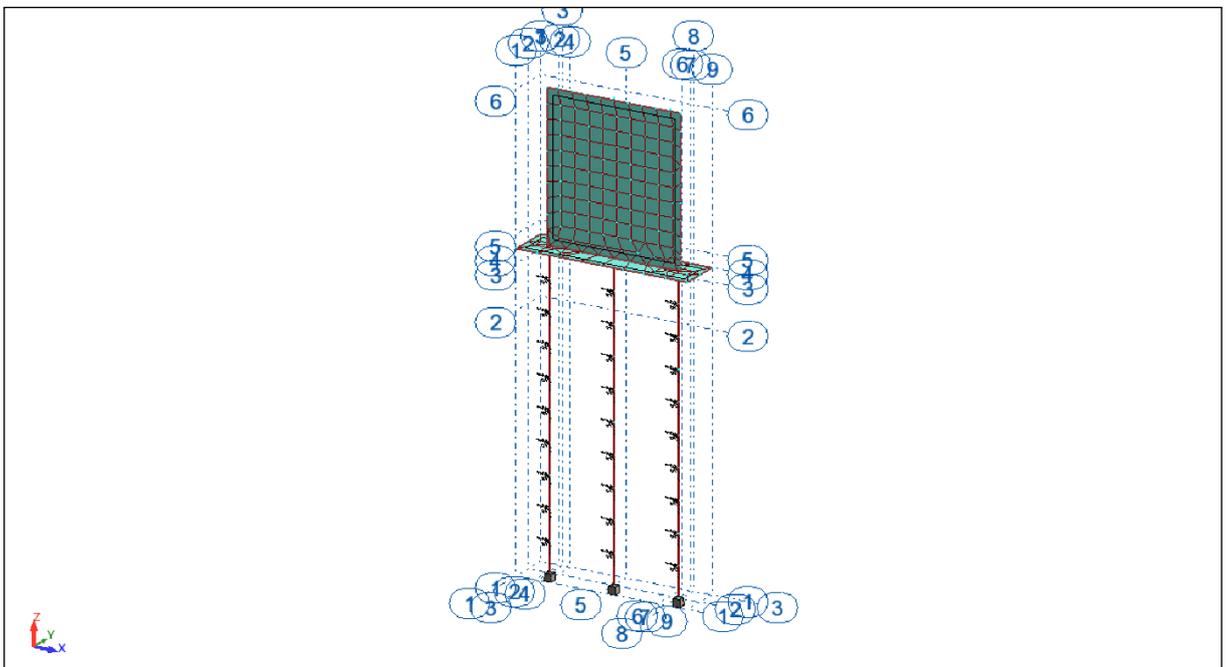


Figure 21: Modèle de calcul des pieux

V.2.2. Actions et sollicitations

Les pieux sont soumis en plus de leurs poids propres, aux charges provenant du tablier de l'ouvrage, de la pile et de la semelle de liaison.

Le modèle de calcul se situant dans la continuité du modèle de calcul de la pile, Les combinaisons d'actions sont identiques à celles que nous avons effectuées pour le calcul de cette dernière.

Nous obtenons ainsi les sollicitations maximales suivantes (tableau 38) :

Tableau 38: Sollicitations maximales pour le dimensionnement des pieux

	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]	MX [kNm]	MY [kNm]	MZ [kNm]
MAX	0,17	1,59	5095,21	0,00	0,16	11,95
Noeud	192	193	194	192	192	194
Cas	33 (C)	33 (C)	33 (C)	1	32 (C)	33 (C)

V.2.3. Ferrailage des pieux

Le ferrailage longitudinal est obtenu à l'aide du calcul des pieux à la flexion composée, en utilisant l'outil de calcul des sections d'acier de béton armée Robot Expert, et nous obtenons ainsi une section d'acier $A_s = 22.6 \text{ cm}^2$.

Cependant, l'Eurocode 2 définit pour les pieux forés, une section minimale d'aciers longitudinaux fonction du diamètre de ce dernier dans le tableau 39 :

Tableau 39: Section minimale d'armature pour les pieux forés (Eurocode 2, Partie 3).

Section transversale du pieu : A_C	Section minimale des armatures longitudinales : A_S
$A_C \leq 0,5 \text{ m}^2$	$A_S \geq \underline{10,005} \cdot A_C$
$0,5 \text{ m}^2 < A_C \leq 1,0 \text{ m}^2$	$A_S \geq \underline{125} \text{ cm}^2$
$A_C > 1,0 \text{ m}^2$	$A_S \geq \underline{10,0025} \cdot A_C$

Dans notre cas de pieux de diamètre 1.2m, nous avons une section minimale $A_{smin} = 28.27 \text{ cm}^2$. Nous retenons ainsi pour les pieux et les fûts des culées, une section longitudinale $A_s = 28.27 \text{ cm}^2$, soit 10 HA 20. Les armatures transversales seront constituées de cerces HA 10 espacés de 30 cm

VI. Etude de quelques équipements de l'ouvrage

Il s'agit dans cette partie, de présenter les résultats de l'étude des équipements qui sont soumis à des efforts importants. Les notes de calculs de chacun des équipements présentés ici sont joints en annexe 6 du présent document.

VI.1. La dalle de transition

La dalle de transition est dimensionnée conformément aux recommandations du SETRA dans le guide « Dalle de transition des pont-route, techniques et réalisation » d'octobre 1984.

Dans la section « Equipements du pont », nous avons défini les caractéristiques géométriques de la dalle de transition :

$L = 3.5m$, $l = 8.5m$, $ed = 0.3m$ et la hauteur de remblai sur la dalle $h_r = 0.2m$

➤ La dalle de transition est calculée en la supposant simplement appuyée d'une part sur le corbeau d'appui, et d'autre part sur le remblai (prenant appui sur une largeur de 60cm de remblai).

➤ Elle est soumise aux surcharges provenant du système des essieux tandem Bt.

➤ Les calculs sont menés à l'état limite ultime.

La figure 22 présente le modèle de calcul de la dalle de transition :

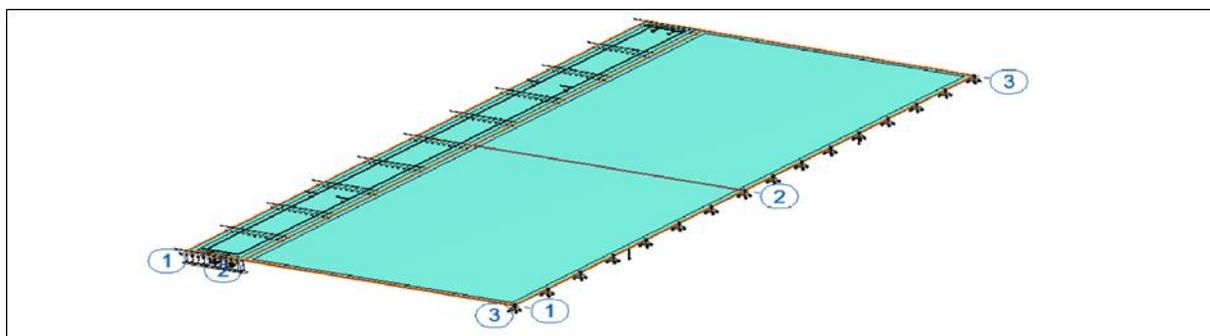


Figure 22: Modèle de calcul de la dalle de transition

Les résultats du calcul sont consignés dans le tableau 40 :

Tableau 40: Résultats du calcul du ferrailage de la dalle de transition

Données	Valeur	Unité
Ferrailage longitudinal		
Lit inférieur		
Section théorique	12.66	cm ² /m
Diamètre choisi	16	mm
Espacement	14	cm
Lit supérieur		
Section théorique	7.13	cm ² /m
Diamètre choisi	10	mm
Espacement	16.5	cm
Ferrailage transversal		
Lits supérieur et inférieur		
Section théorique	4.57	cm ² /m
Diamètre choisi	10	mm
Espacement	16.5	cm ²

La note de calcul complète de la dalle de transition est jointe en annexe 6 du présent document.

VI.2. Les joints de chaussée et de trottoir

Ce sont des dispositifs dont le rôle est de permettre aux véhicules de franchir dans les meilleures conditions de confort et de sécurité, les zones de transition entre le tablier et les chaussées adjacentes à l'ouvrage. Le choix du type de joint est principalement tributaire du souffle qui dépend :

- Des effets dus à la température
- Des effets dus aux déformations différées du béton
- Des actions causées par les charges d'exploitation.

$$S = \Delta l_1 + T + \Delta l_2 = 55.57mm$$

Pour une valeur de souffle $S = 55.73mm$, nous choisissons un joint WOSD 80. Ce joint de chaussée comprend un joint de trottoir TO 50 en alliage d'aluminium.

La note de calcul complète des joints de chaussée et de trottoir est jointe en annexe 6 du présent document.

VI.3. Les appareils d'appui

Les appareils d'appui ont pour rôle de transmettre aux appuis (piles et culées) les efforts provenant du tablier. Ils permettent également les mouvements des abouts du tablier (mouvement de rotation) sous l'effet des charges et des déformations imposées. Les appareils d'appui à disposer dans le cadre de notre projet sont en élastomère fretté, du type B, représenté sur la figure 23 :

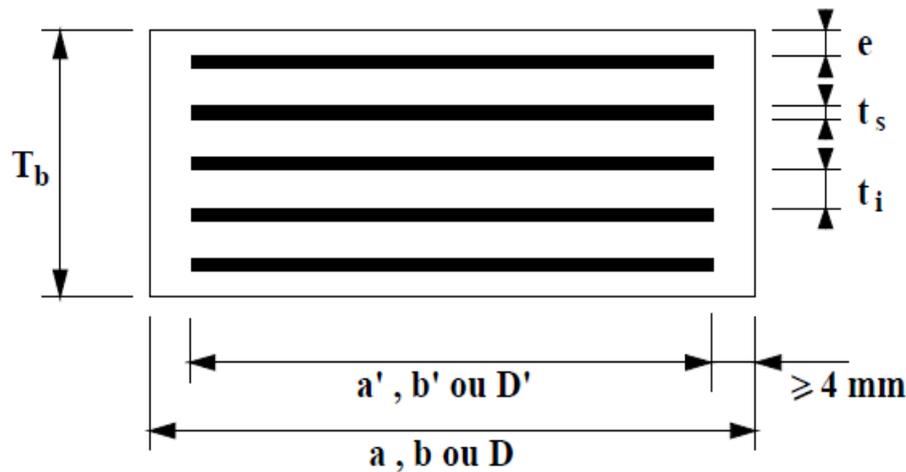


Figure 23: Appareil d'appui de type B

Les règles de dimensionnement et de vérification des appareils d'appuis visent à limiter leur distorsion horizontale totale, sous l'action des sollicitations verticales, horizontales et des déformations horizontales ou angulaires imposées à l'appareil d'appui.

Le dimensionnement que nous avons effectué et joint en annexe 6 du présent document, est conforme au document de référence du SETRA : « Appareils d'appui en élastomère fretté - utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires » de Juillet 2007

VI.3.1. Caractéristiques des appareils d'appui

Le dimensionnement et la vérification des appareils d'appui ont conduit aux résultats récapitulés dans le tableau 41 :

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

Tableau 41: Caractéristiques des appareils d'appui

Désignation	Epaisseur des feuillets internes (mm)	Nombre de feuillets d'élastomère	Epaisseur totale du feuillet d'élastomère (mm)	Epaisseur des frettes (mm)	Position de l'appui	Dimensions (mm)
400×600; 5(12×3); 2×6	12	5	72	3	Intermédiaire	400X600X90
300×400; 5(10×3); 2×5	10	5	60	3	Rive	300X400X78

VI.3.2. Bossages d'appui

Pour une mise en place correcte des appareils d'appui et pour permettre leur changement éventuel, nous mettrons en œuvre des bossages d'appui, dont le rôle est :

- De matérialiser l'emplacement des appareils d'appui
- D'assurer la mise hors d'eau des appareils d'appui, principalement sur les piles culées.

VI.3.2.1. Caractéristiques géométriques des bossages

Les caractéristiques géométriques des bossages sont renseignées dans le tableau 42 :

Tableau 42: Caractéristiques géométriques des bossages

Position du bossage	A en cm (perpendiculaire à la ligne d'appui)	B en cm (parallèle à la ligne d'appui)	Hauteur du bossage supérieur hs (en cm)	Hauteur du bossage inférieur hi (en cm)
Rive	40	50	6	10
Intermédiaire	50	70	7.2	10

VI.3.2.2. Armatures de frettage des bossages

Les armatures de frettage des bossages d'appui sont renseignées dans le tableau 43 :

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

Tableau 43: Armatures de frettage des bossages

Désignation	Dimensions (cm)	Section minimale d'acier (cm ²)	Enrobage (cm)	Diamètre de l'acier (mm)	Nombre de branches	Espacement (cm)	Section réelle d'acier (cm ²)
Bossage intermédiaire	50	5,41	3	12	5	11	5,65
	70					16	
Bossage de rive	40	1,87	3	8	4	11,33	2,01
	50					14,67	

Au terme de ce chapitre, nous avons présenté les bases et hypothèses de calcul prescrites par le maître d'ouvrage, nous avons également présenté les résultats des études des différentes parties de l'ouvrage ainsi que ceux des équipements. Nous rappelons que les études ont été menées en fissuration préjudiciable, et lesdites études sont jointes en annexe du présent document.

CHAPITRE III : DEVIS ESTIMATIF ET PLANNING

PREVISIONNEL DES TRAVAUX

Ce chapitre présente d'une part l'évaluation des quantités des matériaux à mettre en œuvre pour la réalisation de l'ouvrage, afin de dresser un devis estimatif sur la base des prix unitaires fournis par le Cahier des Clauses Administratives Particulières (CCAP) du projet de construction de l'autoroute Yaoundé-Douala, et d'autre part, l'évaluation sommaire du délai d'exécution des travaux de réalisation de l'ouvrage.

Le tableau 44 est un récapitulatif du devis estimatif de l'ouvrage.

Tableau 44: Récapitulatif du devis estimatif de l'ouvrage

N°	Désignation des lots	Prix en FCFA (HTVA)
Lot 601	TERRASSEMENT	7 212 156
Lot 602	PIEUX	111 059 396
Lot 603	COFFRAGE	22 506 905
Lot 604	BETON	213 018 021
Lot 605	ARMATURES (HA)	134 179 247
Lot 606	SUPERSTRUCTURE ET EQUIPEMENTS	68 456 163
Lot 607	EPREUVE D'OUVRAGE	5 250 000
TOTAL GENERAL (HTVA)		561 681 889
TVA (19,25%)		108 123 764
TOTAL GENERAL (TTC)		669 805 653
Arrêté le présent devis à la somme de : Six cent soixante-neuf millions huit cent cinq mille six cent cinquante-trois Francs CFA		

Le cout de l'ouvrage est estimé à 669 805 653 FCFA TTC et le délai de réalisation de l'ouvrage est estimé à 10 mois. Le devis estimatif détaillé ainsi que le planning prévisionnel sont joints en annexe 1 du présent document.

CONCLUSION

Le développement économique du Cameroun en vue de l'atteinte de son émergence passe nécessairement par la construction d'infrastructures routières performantes en général, et la construction de l'autoroute Yaoundé-Douala en particulier, qui constitue un axe majeur dans les corridors Douala-Bangui et Douala-Ndjamena. La première phase de construction de cette autoroute concerne la réalisation des études sur un linéaire de 100 Km, et la réalisation des travaux sur un linéaire 68.3 Km et 25 Km de voie de rétablissement, à partir de Yaoundé, financé à 85% par EXIMBANK-CHINA et à 15% par le gouvernement Camerounais pour un montant de 338 670 000 000 TTC F CFA. Les missions de maîtrise d'œuvre confié au groupement SCET TUNISIE/LOUIS BERGER et d'assistance à maîtrise d'ouvrage géotechnique confié au LABOGENIE sont financé par le gouvernement du Cameroun à raison de 5 387 036 348 FCFA TTC et 1 724 088 043 FCFA TTC respectivement. La construction de cette autoroute nécessite la réalisation d'ouvrages de franchissements, tel que celui permettant le franchissement de l'autoroute au PK1+956, et le présent mémoire de fin d'étude a ainsi pour objectif principal d'en effectuer les études techniques détaillées, basées principalement sur les résultats des études topographiques et géotechniques réalisées sur le site du projet.

Une analyse multicritère nous a permis de sélectionner parmi les différents types d'ouvrages définis par le SETRA, toutes les solutions techniquement envisageables, et de procéder par élimination pour retenir la solution la mieux adaptée au franchissement de l'obstacle (l'autoroute Yaoundé-Douala). Il s'agit d'un passage supérieur en dalle armée de 68.2m de longueur totale, dont le tablier est une structure monolithique à épaisseur variable (de 25cm à 82,75) sur cinq appuis simples, constituant ainsi quatre travées de 14m, 19.6m, 19.6m et 14m de portées respectives. Les appuis intermédiaires sont constitués de voiles de 7.5m de longueur, 0.7m de largeur et 7m de hauteur maximale transmettant les efforts aux pieux circulaires de 1.2m de diamètre et 17m de hauteur par l'entremise d'une semelle de liaison de 9.6m de longueur, 2.4m de largeur et 1.5m de hauteur. Les appuis de rive quant à eux sont constitués de piles-culées enterrées reposant sur des fûts circulaires d 1.2m de diamètre et 12m de hauteur par l'intermédiaire du sommier d'appui de 10.2m de longueur, 1.5m de largeur et 1m de hauteur.

La modélisation et le dimensionnement complet de l'ouvrage à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis 2015 en tenant compte de toutes les prescriptions du maître d'ouvrage consignées dans le CCTP (hypothèses générales de calcul, documents de références,

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE YAOUNDE-DOUALA AU CAMEROUN

charges applicables, caractéristiques des matériaux, ...) a abouti à l'élaboration des différents plans d'exécution joints en annexe du présent document.

Le devis quantitatif et estimatif effectué sur la base des prix unitaires consignés dans le CCAP nous a permis de chiffrer le coût de réalisation de cet ouvrage à 669 805 653 FCFA TTC. Le délai d'exécution des travaux est estimé à 10 mois.

Ce stage de fin d'étude nous a permis de mettre en pratique les connaissances acquises tout au long de notre formation, mais également de nous familiariser avec le monde professionnel et de capitaliser de nouvelles compétences.

BIBLIOGRAPHIE

Articles scientifiques et ouvrages

- [1] BERNARD- GELY, A., and J-A. CALGARO (2000), Conception des ponts, Techniques de l'Ingénieur, (C4500), 2-24.
- [2] CALGARO, J-A. (2000), Projet et construction des ponts-Généralités, Fondations, Appuis, Ouvrages courants, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [3] Ministère de l'équipement et du logement, et Ministère de l'économie et des finances (1981), Fascicule n°61 Titre II du CCTG : Programmes de charges et épreuves des ponts routes, Texte officiel.
- [4] Ministère de l'équipement, des transports et du logement (1999), Fascicule n°62-Titre I Section I du CCTG : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites-BAEL 91 révisé 99, Texte officiel.
- [5] Ministère de l'équipement, des transports (1993), Fascicule n°62 Titre V du CCTG : Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil, Texte officiel.
- [6] SETRA (1989), Ponts-dalles, Guide de conception.
- [7] SETRA (1977), Piles et Palées (PP73) : Appuis des tabliers, Dossier pilote.
- [8] SETRA (1984), Dalles de transition des ponts routes : Technique et réalisation.
- [9] SETRA (1989), Assainissement des ponts-routes : Evacuation des eaux, perrés, drainage, corniches-caniveaux.
- [10] SETRA (1994), Aménagement des routes principales, Guide technique.
- [11] SETRA (1997), Fondations courantes d'ouvrages d'art, FOND.72, Extraits Fascicules 2-3-4.
- [12] SETRA (1999), Guide du projeteur d'ouvrages d'art-Ponts courants, Bagneux.
- [13] SETRA (2002), Choix d'un dispositif de retenue en bord libre d'un pont en fonction du site ; guide technique GC.

[14] SETRA (2007), Appareils d'appui en élastomère fretté – Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires, Guide technique.

Polycopiés de cours

[15] Dr. Adamah P.-S. MESSAN, (2013), Cours de béton armé, Polycopié du 2^{ie} de Ouagadougou.

[16] MONGI, BEN, OUEZDOU. (2012), Polycopié de l'ENIT de Tunis, Cours d'Ouvrages d'Art, Tome 1 : Conception.

[17] MONGI, BEN, OUEZDOU. (2012), Polycopié de l'ENIT de Tunis, Cours d'Ouvrages d'Art, Tome 2 : Dimensionnement.

ANNEXES

ANNEXE 1 : DEVIS ESTIMATIF ET PLANNING PREVISIONNEL	78
ANNEXE 2 : PROFIL EN LONG DE LA VOIE PORTEE – PROFILS EN TRAVERS PK1+940 ET PK1+960.....	79
ANNEXE 3 : RAPPORT D'ETUDE GEOTECHNIQUE.....	80
ANNEXE 4 : ETUDE DU TABLIER DE L'OUVRAGE	81
ANNEXE 5 : ETUDE DES APPUIS DE L'OUVRAGE	82
ANNEXE 6 : ETUDE DES EQUIPEMENTS DE L'OUVRAGE	83
ANNEXE 7 : DOCUMENTS GRAPHIQUES RELATIFS A L'OUVRAGE.....	84

**ANNEXE 1 : DEVIS ESTIMATIF ET PLANNING
PREVISIONNEL**

Voir document annexe.

**ANNEXE 2 : PROFIL EN LONG DE LA VOIE PORTEE –
PROFILS EN TRAVERS PK1+940 ET PK1+960**

Voir document annexe.

ANNEXE 3 : RAPPORT D'ETUDE GEOTECHNIQUE

Voir document annexe.

ANNEXE 4 : ETUDE DU TABLIER DE L'OUVRAGE

Voir document annexe.

ANNEXE 5 : ETUDE DES APPUIS DE L'OUVRAGE

Voir document annexe.

ANNEXE 6 : ETUDE DES EQUIPEMENTS DE L'OUVRAGE

Voir document annexe.

**ANNEXE 7 : DOCUMENTS GRAPHIQUES RELATIFS A
L'OUVRAGE**

Voir document annexe.