



## **Étude technique du pont sur le Massili et de ses voies d'accès dans le cadre de l'élargissement de la Route Nationale n°4**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE  
**MASTER**

**SPECIALITE Génie Civil – Bâtiment et Travaux Publics**

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 19 Janvier 2026 par

**Juste DJOTTO (20170654)**

**Directeur de mémoire :**

**Encadrant 2iE : Dr Louis Arnaud OUEDRAOGO Enseignant-Chercheur, Département Génie Civil, Institut 2iE.**

**Maître de stage : Soumaila OUATTARA, ingénieur génie civil chez Globex Construction**

Structure (s) d'accueil du stage : Globex Construction

Jury d'évaluation du stage :

Président : Wennd Kouni Igor OUEDRAOGO

Membres : Dr Mamadou Pousga Junior KABORE

Membres : M. Marc COMBERE

**Promotion 2025 - 2026**

## DÉDICACE

À Dieu Tout-Puissant, pour Sa grâce infinie, Sa protection et la force qu'Il m'a donnée dans les moments difficiles.

À mon cher père, Monsieur TOSSOU Léon, pour son soutien indéfectible, ses sacrifices silencieux, sa patience et sa confiance inébranlable en ma réussite.

Ce travail est le fruit de ses efforts, de son amour et de ses encouragements constants.

À ma famille, pour son appui et ses prières.

## REMERCIEMENTS

Nous ne saurions commencer la présentation de ce travail sans adresser nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont accompagnés et soutenus tout au long de notre mémoire.

- ✚ Nos remerciements vont tout d'abord à Dr Louis Arnaud OUEDRAOGO, Enseignant-Chercheur au 2iE, pour son accompagnement, ses conseils avisés et son soutien tout au long de notre formation et de la réalisation de ce mémoire.
- ✚ Nous exprimons également notre gratitude à Monsieur Issaka KANAZOE, Directeur Général de Globex Construction, pour nous avoir accueillis au sein de son entreprise en tant que stagiaire et pour la confiance qu'il nous a accordée.
- ✚ Nos remerciements vont à M. Soumaïla OUATTARA, Chef des travaux à Globex Construction et notre encadreur, qui, malgré ses nombreuses occupations, a toujours été disponible pour nous prodiguer conseils et éclaircissements précieux.
- ✚ Nous exprimons une reconnaissance particulière à Monsieur TOSSOU Léon pour son soutien financier déterminant, qui a largement contribué au bon déroulement de nos études et à l'aboutissement de ce mémoire.

## Résumé

La conception d'un ouvrage d'art nécessite la prise en compte simultanée de contraintes techniques, structurelles, économiques et environnementales. Le présent mémoire porte sur l'étude, la conception et le dimensionnement d'un pont à poutres en béton armé destiné au franchissement du cours d'eau du Massili, dans le cadre de l'aménagement et de l'élargissement de la Route Nationale n°4 (RN4).

L'étude a débuté par l'analyse du contexte général du projet, des caractéristiques du site et des données disponibles, notamment hydrauliques et géotechniques. Sur cette base, les hypothèses de calcul ont été définies, incluant les charges permanentes, les surcharges d'exploitation routière, ainsi que les effets dynamiques liés au trafic. Plusieurs variantes de franchissement ont ensuite été examinées et comparées à l'aide d'une analyse multicritère, intégrant des critères techniques, fonctionnels, économiques et de constructibilité, ce qui a conduit au choix d'une solution optimisée.

La solution retenue consiste en un pont à poutres en béton armé à trois travées, reposant sur des culées et une pile intermédiaire. La modélisation globale de l'ouvrage a été réalisée à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis, basé sur la méthode des éléments finis. Cette modélisation a permis d'évaluer les sollicitations internes (moments fléchissant, efforts tranchants et efforts normaux) aux États Limites Ultimes (ELU) et aux États Limites de Service (ELS). Le dimensionnement du tablier, des poutres, du hourdis, des appuis et des fondations a été effectué conformément aux prescriptions réglementaires en vigueur, notamment pour le béton armé.

Les fondations ont été dimensionnées à partir des résultats des essais pressiométriques de type Ménard, permettant de vérifier la capacité portante du sol et d'assurer une transmission sécurisée des charges vers le terrain naturel. Les voies d'accès ont été conçues pour une vitesse de référence de 60 km/h, avec une structure de chaussée adaptée au trafic attendu, comprenant une couche de roulement en béton bitumineux, une couche de base en grave-bitume et une couche de fondation en matériaux granulaires améliorés.

Les impacts environnementaux du projet ont été pris en compte de manière qualitative, en identifiant les effets potentiels liés aux phases de construction et d'exploitation de l'ouvrage, ainsi que des mesures générales visant à en limiter les conséquences sur le milieu naturel.

Le coût global estimatif du projet est évalué à 647 479 499,20 FCFA, incluant les travaux de construction de l'ouvrage, les aménagements associés et les voies d'accès.

Mots clés : ouvrage d'art, analyse multicritère, pont à poutres, modélisation, béton armé.

## Abstract

The design of a civil engineering structure requires the consideration of technical, structural, economic, and environmental constraints. This thesis focuses on the study, design, and structural dimensioning of a reinforced concrete girder bridge intended to cross the Massili River, as part of the upgrading and widening works of National Road No. 4 (RN4).

The study began with an analysis of the project context, site conditions, and available data, including hydraulic and geotechnical characteristics. Based on these inputs, the design assumptions were defined, taking into account permanent loads, traffic loads, and dynamic effects induced by vehicular traffic. Several bridge alternatives were examined and compared through a multi-criteria analysis, incorporating technical, functional, economic, and constructability aspects, which led to the selection of the most appropriate solution.

The adopted solution consists of a three-span reinforced concrete girder bridge, supported by abutments and an intermediate pier. The global structural behavior of the bridge was modeled using Autodesk Robot Structural Analysis, based on the finite element method. This modeling allowed the evaluation of internal forces (bending moments, shear forces, and axial forces) under both Ultimate Limit States (ULS) and Serviceability Limit States (SLS). The superstructure, bearings, substructure, and foundations were designed in accordance with the applicable design standards for reinforced concrete structures.

The foundations were designed using results from Menard pressuremeter tests, ensuring an adequate bearing capacity of the soil and a safe transfer of loads to the ground. The approach roads were designed for a reference speed of 60 km/h, with a pavement structure adapted to the expected traffic, including a bituminous concrete wearing course, a bitumen-treated base layer, and an improved granular subbase.

Environmental aspects were addressed qualitatively by identifying potential impacts during both construction and operational phases, along with general mitigation measures aimed at reducing the project's effects on the surrounding environment.

The total estimated cost of the project is 647,479,499.20 FCFA, covering the construction of the bridge, associated works, and approach roads.

Keywords: civil engineering structure, multicriteria analysis, girder bridge, modeling, reinforced concrete.

## Table of Contents

|                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| DÉDICACE.....                                                     | i    |
| REMERCIEMENTS .....                                               | ii   |
| Résumé.....                                                       | iii  |
| Abstract .....                                                    | iii  |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                          | viii |
| LISTE DES FIGURES.....                                            | viii |
| LISTE DES ABREVIATIONS.....                                       | ix   |
| Introduction .....                                                | 1    |
| I. Présentations de la structure d'accueil et du projet.....      | 3    |
| I.1. Présentation de la structure d'accueil .....                 | 3    |
| I.2. Présentation du projet. ....                                 | 4    |
| I.2.1. Contexte du projet .....                                   | 4    |
| I.2.2. Objectif général .....                                     | 4    |
| I.2.3. Objectifs spécifiques .....                                | 4    |
| I.2.4. Localisation de la zone du projet.....                     | 6    |
| I.2.5. Climat et végétation .....                                 | 9    |
| II. Généralités et étude préliminaire d'ouvrages d'art .....      | 10   |
| II.1. Généralités sur les ponts .....                             | 10   |
| II.2. Etudes préliminaires.....                                   | 11   |
| II.2.1. Prédimensionnement des variantes .....                    | 14   |
| II.2.2. Équipements de l'ouvrage .....                            | 15   |
| II.2.3. Prédimensionnement de la variante 1 : .....               | 15   |
| II.2.1. Prédimensionnement de la variante 2 : .....               | 17   |
| II.2.2. Analyse multicritère des deux variantes étudiées .....    | 18   |
| III. PROJET D'OUVRAGE D'ART : ETUDE DETAILLEE .....               | 20   |
| III.1. Description de l'ouvrages .....                            | 20   |
| III.2. Normes, règlements et notes d'hypothèses générales .....   | 21   |
| III.2.1. Les Références réglementaires et normes techniques ..... | 21   |
| III.2.2. Charges de calculs .....                                 | 21   |
| III.2.3. Caractéristiques des matériaux .....                     | 22   |
| III.3. Dimensionnement des éléments du tablier .....              | 22   |
| III.3.1. Dimensionnement du hourdis.....                          | 22   |
| III.3.2. Dimensionnement des poutres maitresse.....               | 26   |
| III.3.3. Justification des entretoises .....                      | 28   |
| III.4. Dimensionnement des éléments de la pile .....              | 28   |

|          |                                                                                         |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.4.1  | Etude du chevêtre .....                                                                 | 29 |
| III.4.2  | Etude des colonnes .....                                                                | 30 |
| III.4.3  | Etude de la semelle.....                                                                | 30 |
| III.5.   | Dimensionnement des éléments de la culée.....                                           | 32 |
| III.5.1. | Vérification de la stabilité externe de la culée.....                                   | 33 |
| III.5.2. | Vérification de la stabilité interne : étude structurale des éléments de la culée<br>35 |    |
| III.5.3. | Etude de la dalle de transition.....                                                    | 36 |
| III.5.4. | Etude des murs en retour .....                                                          | 37 |
| III.5.5. | Etude des appareils d'appuis .....                                                      | 38 |
| III.6.   | Modélisation sous Autodesk Robot Structural Analysis.....                               | 38 |
| III.6.1. | Présentation du logiciel Robot Structural Analysis .....                                | 38 |
| III.6.2. | Modélisation .....                                                                      | 39 |
| III.6.3. | Application et combinaison des charges – Analyse des sollicitations.....                | 40 |
| III.6.4. | Analyse et visualisation des sollicitations internes.....                               | 43 |
| IV.      | ETUDE DES VOIES D'ACCES .....                                                           | 43 |
| IV1.     | Tracé en plan .....                                                                     | 44 |
| IV2.     | Profil en long.....                                                                     | 45 |
| IV3.     | Profil en travers type .....                                                            | 46 |
| IV4.     | Dimensionnement de la chaussée .....                                                    | 47 |
| IV5.     | Signalisation routière .....                                                            | 52 |
| V.       | ASPECT ENVIRONNEMENTALE .....                                                           | 54 |
| V.1      | Cadre juridique national en matière d'environnement et de développement durable<br>55   |    |
| V.2      | Cadre institutionnel impliqué.....                                                      | 55 |
| V.3      | Instruments internationaux et engagements sous-régionaux .....                          | 56 |
| V.4      | Impacts environnementaux potentiels.....                                                | 56 |
|          | Impacts négatifs – phase de travaux.....                                                | 56 |
|          | Impacts négatifs – phase d'exploitation .....                                           | 56 |
|          | Impacts positifs .....                                                                  | 57 |
|          | Mesures d'atténuation proposées .....                                                   | 58 |
| VI.      | Le devis estimatif. ....                                                                | 59 |
| VI.1     | Récapitulatif.....                                                                      | 61 |
|          | Conclusion.....                                                                         | 62 |
|          | Perspectives et recommandations.....                                                    | 63 |
|          | Bibliographie.....                                                                      | 64 |

|              |    |
|--------------|----|
| Annexe ..... | 66 |
|--------------|----|

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1: Gammes de portées des ponts courants .....                             | 12 |
| Tableau 2: Analyse comparative multicritère des deux variantes .....              | 19 |
| Tableau 3: Sollicitations dues aux charges d'exploitation (non pondérées) .....   | 27 |
| Tableau 4: Sollicitations dans l'entretoise en fonction des cas de charges .....  | 28 |
| Tableau 5: Paramètres géométriques du tracé en plan .....                         | 45 |
| Tableau 6: Synthèse des caractéristiques géométriques pour la catégorie R80 ..... | 45 |
| Tableau 7 : Paramètres géométriques du profil en long .....                       | 46 |
| Tableau 8: Paramètres de tracé en plan et en profil – Catégorie R80 .....         | 46 |
| Tableau 9: Tableau des classes de trafic (NPL) officiel SETRA : .....             | 48 |
| Tableau 10: Tableaux des variantes de dimensionnement de la chaussée .....        | 50 |
| Tableau 11: Analyse comparative synthétique des variantes .....                   | 51 |
| Tableau 12 : Mesures d'atténuation proposées .....                                | 58 |
| Tableau 13: Le devis estimatif .....                                              | 60 |
| Tableau 14 : Récapitulatif devis estimatif .....                                  | 61 |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1: Localisation de la zone du projet. ....                           | 6  |
| Figure 2: Localisation exacte du site du pont sur le Massili. ....          | 7  |
| Figure 3: Profil en long de l'ouvrage .....                                 | 16 |
| Figure 4: Coupe transversale du tablier de la variante en poutre .....      | 17 |
| Figure 5: Coupe transversale de la variante en dalle .....                  | 18 |
| Figure 6: Modélisation du hourdis dans le sens transversal .....            | 22 |
| Figure 7: Diffusion des charges localisées dans la dalle .....              | 23 |
| Figure 8: Modélisation de la partie en encorbellements du hourdis .....     | 25 |
| Figure 9: Modèle de chargement du chevêtre .....                            | 29 |
| Figure 10: Nomenclature et géométrie de la culée de l'ouvrage projeté ..... | 33 |

## LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

BA : Béton Armé

BAEL : Béton Armé aux Etats Limites

BN : Barrière Normale

CBR : Californian Bearing Ratio (Indice de Portance Californien)

CEBTP : Centre Expérimental de recherches et d'études du Bâtiment et des travaux Publics

ELS : Etat Limite de Service

ELU : Etat Limite Ultime

FP : Fissuration Préjudiciable

HA : Haute Adhérence

HT : Hors Taxes

Lc : Largeur Chargeable

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

NE : Nombre d'Essieux équivalent

OA : Ouvrage d'Art

PP : Pile et Palées

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

TPC : Terre-Plein Centrale

Vr : Vitesse de référence

# Introduction

Le développement économique et social du Burkina Faso est étroitement lié à la qualité de ses infrastructures de transport. Dans un contexte marqué par une croissance démographique soutenue et une intensification progressive des échanges, l'amélioration du réseau routier apparaît comme un levier essentiel pour renforcer la mobilité et accompagner le développement des territoires. Les ouvrages d'art occupent, à cet égard, une place déterminante, car ils assurent la continuité du trafic, contribuent à la sécurité des usagers et participent à la pérennité des axes de communication. La Route Nationale n°4 (RN4), qui relie Ouagadougou aux régions de l'Est, constitue un exemple représentatif de ces enjeux. L'augmentation régulière du trafic sur cet axe met en évidence la nécessité de disposer d'infrastructures adaptées, notamment au niveau des points de franchissement hydrauliques. Le passage du Massili représente ainsi un point sensible du tracé, où la réalisation d'un pont apparaît comme une solution indispensable pour améliorer la fluidité de la circulation et renforcer la fiabilité de cet itinéraire stratégique. La conception d'un tel ouvrage doit répondre à des exigences multiples, intégrant à la fois la sécurité structurale, la performance fonctionnelle et une insertion compatible avec l'environnement naturel et humain, tout en respectant les normes techniques et les contraintes économiques en vigueur.

La complexité du site du Massili, associée aux exigences de performance et de pérennité, impose une approche technique rigoureuse et adaptée au contexte local. De cette réflexion émerge la problématique suivante :

« Comment réaliser une étude technique complète d'un pont sur le Massili, afin d'assurer la sécurité des usagers, la pérennité de l'ouvrage et son intégration harmonieuse dans un environnement naturel et humain contraint ? »

L'objectif général de ce mémoire est de conduire une étude technique approfondie du pont projeté sur le Massili, en intégrant les exigences de sécurité, de durabilité et d'efficacité structurelle, tout en évaluant son impact sur l'environnement et le développement local.

Les objectifs spécifiques consistent à :

- Prédimensionner différentes variantes d'ouvrages de franchissement ;
- Comparer ces solutions à l'aide d'une analyse multicritère et retenir la plus pertinente ;
- Effectuer les études structurales détaillées de la variante choisie ;

Établir les plans d'exécution des éléments constitutifs du pont ;

Évaluer les impacts environnementaux associés à sa construction.

### Organisation du mémoire

Le document est structuré de la manière suivante :

- une présentation générale du projet ;
- les études d'avant-projet de l'ouvrage d'art ;
- l'étude détaillée du projet (calculs et dimensionnements) ;
- l'étude des voies d'accès
- Évaluer les impacts environnementaux associés à sa construction
- le devis estimatif.

## I. Présentations de la structure d'accueil et du projet.

### I.1. Présentation de la structure d'accueil

Globex Construction est une entreprise spécialisée dans les domaines de la construction et des infrastructures, reconnue pour son positionnement orienté vers la réalisation d'ouvrages durables et conformes aux standards techniques. Créée pour répondre aux besoins croissants en infrastructures modernes, l'entreprise s'appuie sur une expertise technique solide et une organisation axée sur la qualité d'exécution.

Son intervention repose sur la mise en œuvre de solutions constructives fiables, intégrant les exigences de performance, de respect de l'environnement et de maîtrise des coûts. Globex Construction accorde également une importance particulière au respect des délais contractuels, élément essentiel dans la conduite des projets d'infrastructures.

Implantée à Ouagadougou, dans le quartier de Ouaga 2000, l'entreprise bénéficie d'un emplacement stratégique lui permettant d'accompagner efficacement les projets de développement économique et social à l'échelle nationale.

Fiche signalétique de Globex Construction :

- Raison sociale : Globex Construction
- Année de création : 2007
- Adresse du siège : Rue André Aubaret, Ouaga 2000
- Email : [globex.construction@yahoo.fr](mailto:globex.construction@yahoo.fr)
- Site internet : [www.globexconstructionbf.com](http://www.globexconstructionbf.com)
- Téléphone : (+226) 25 38 89 48
- Directeur général : Issaka KANAZOE

Domaine d'intervention

Forte de son expertise, l'entreprise intervient dans divers secteurs, notamment.

- BTP Génie Civil
- Location d'engins
- Globex carrière.

## I.2. Présentation du projet.

### I.2.1. Contexte du projet

Dans ce cadre, l'amélioration et la modernisation des grands axes routiers nationaux apparaissent comme des priorités pour répondre aux besoins croissants de mobilité, stimuler les échanges commerciaux et renforcer la compétitivité du pays.

La Route Nationale 4 (RN4), reliant Ouagadougou à la frontière avec le Niger en traversant plusieurs régions de l'Est, occupe une place stratégique dans le réseau routier national. Elle constitue non seulement un axe de transit international important pour le commerce sous-régional, mais également un vecteur de désenclavement pour les populations locales. Cependant, la croissance démographique, l'augmentation du trafic routier et la dégradation progressive des infrastructures existantes rendent indispensable son élargissement et sa modernisation.

Dans ce contexte, le franchissement du cours d'eau Massili par un pont constitue une étape déterminante. En effet, ce passage est soumis à des contraintes naturelles (débits variables, crues saisonnières) et humaines (intensification du trafic), qui exigent la mise en place d'un ouvrage adapté, sûr et durable. L'absence ou l'insuffisance d'un tel aménagement compromettrait non seulement la continuité du trafic sur la RN4, mais aussi la sécurité des usagers et le développement socio-économique des localités riveraines.

### I.2.2. Objectif général

L'objectif général du présent projet est de réaliser les études de conception et de dimensionnement d'un ouvrage d'art assurant le franchissement du Massili, dans le cadre de l'aménagement de la RN4. Cette étude vise à garantir un niveau satisfaisant de sécurité pour les usagers, la durabilité de l'ouvrage et son efficacité fonctionnelle, tout en respectant les normes techniques et environnementales applicables et en assurant la continuité du trafic.

### I.2.3. Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre cet objectif général, plusieurs objectifs spécifiques ont été définis :

Prédimensionner différentes variantes d'ouvrages de franchissement et effectuer une analyse multicritère pour sélectionner la solution optimale ;

Procéder au dimensionnement complet de la variante retenue, en étudiant l'ensemble des éléments structuraux (tablier, poutres principales, appuis, semelles, fondations, etc.) ;

Élaborer les plans d'exécution des différentes composantes du pont ;

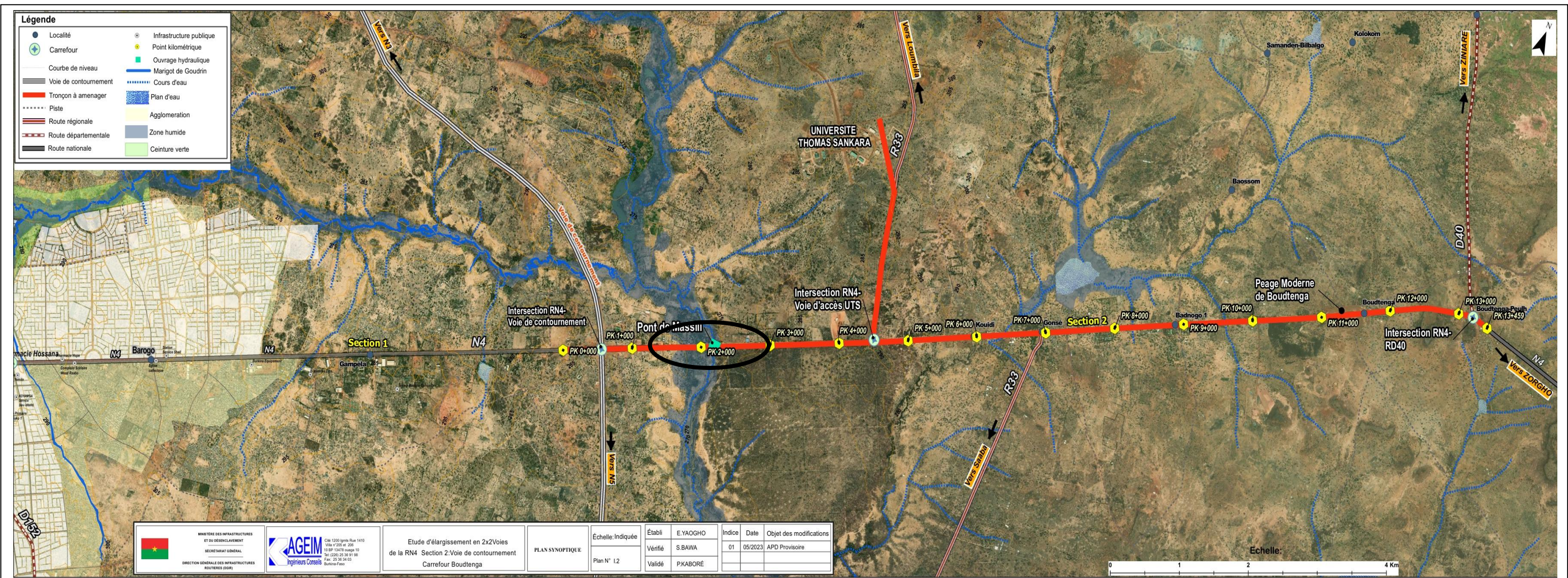
Étudier les voies d'accès et proposer un aménagement cohérent avec le profil en travers de la RN4 élargie ;

Intégrer la dimension environnementale et sociale, en identifiant les impacts potentiels du projet et les mesures d'atténuation appropriées



Après la présentation générale de la situation géographique du projet, il est important de s'intéresser plus spécifiquement à la zone d'étude. En effet, la carte précédente a permis de situer l'ensemble du projet dans son contexte régional, tandis que la présente carte met en évidence la localisation exacte du site d'implantation du pont sur le Massili. Cette précision permet de mieux appréhender les caractéristiques du milieu immédiat dans lequel s'inscrit l'ouvrage.

La zone d'étude concerne le site de franchissement du cours d'eau du Massili par la Route Nationale n°4 (RN4), situé entre les points kilométriques PK 2+000.



### I.2.5. Climat et végétation

#### Climat

La zone appartient à la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso, caractérisée par deux saisons bien distinctes : une saison sèche longue (de novembre à mai) et une saison des pluies de durée plus courte (de juin à octobre).

Les hauteurs annuelles de précipitations restent modérées et se situent, de manière globale, dans une fourchette comprise entre 600 et 900 mm.

Les températures moyennes sont élevées, en particulier durant la saison sèche, avec des pics thermiques observés avant l'installation des pluies. Pendant la saison pluvieuse, les températures tendent à être légèrement plus modérées, mais s'accompagnent d'un taux d'humidité plus élevé. La période sèche est également marquée par l'influence de l'Harmattan, vent dominant provenant des secteurs nord-est à est, qui transporte des particules de poussière, réduisant la visibilité et accentuant les phénomènes d'évaporation.

#### Végétation

Sur le plan de la couverture végétale, la zone d'étude appartient au domaine de la savane soudano-sahélienne. Elle est principalement constituée de formations de savane arbustive et de savane arborée claire. La strate herbacée est dominée par des graminées annuelles à cycle de développement court, dont la croissance est étroitement liée au régime pluviométrique saisonnier. Ces espèces apparaissent rapidement après les premières pluies, accomplissent leur cycle biologique en quelques semaines et disparaissent en saison sèche, ne subsistant qu'à l'état de graines dans le sol.

À proximité immédiate du cours d'eau Massili, la végétation devient plus dense, avec la présence de formations ripicoles ou forêts-galeries, adaptées aux conditions d'humidité saisonnière des berges. L'environnement local comprend également des zones partiellement dégradées ou anthropisées, traduisant l'influence des activités humaines, ainsi que des îlots de végétation naturelle subsistant dans les secteurs où les conditions pédologiques sont favorables.

## II. Généralités et étude préliminaire d'ouvrages d'art

### II.1. Généralités sur les ponts

#### ➤ Définition et évolution

Les ponts sont des ouvrages d'art permettant le franchissement d'obstacles naturels ou artificiels (cours d'eau, routes, voies ferrées, vallées, etc.) tout en garantissant la sécurité et la continuité de la circulation des usagers.

L'histoire de la construction des ponts témoigne d'une évolution progressive des techniques et des matériaux utilisés. Les premiers ouvrages de franchissement étaient réalisés à partir de matériaux disponibles localement, tels que la pierre, le bois ou encore des éléments végétaux. Avec les avancées scientifiques et technologiques, ces solutions traditionnelles ont progressivement laissé place à des matériaux offrant de meilleures performances mécaniques et une plus grande durabilité. L'introduction du béton armé a constitué une étape déterminante dans cette évolution. Mis au point au XIX<sup>e</sup> siècle, notamment à travers les travaux de Joseph Monier en 1867, ce matériau a profondément transformé les pratiques du génie civil. Par la suite, le développement du béton précontraint a permis d'envisager des portées plus importantes et des structures plus élancées, faisant de ces matériaux les solutions dominantes dans la construction des ouvrages d'art contemporains.

#### ➤ Principaux types de ponts courants

Selon le guide du SETRA (2000), les ponts courants peuvent être regroupés en trois grandes familles en fonction de leur conception et de leurs conditions d'emploi.

##### ▪ Les ponts cadres et portiques

Ces ouvrages sont généralement réalisés sur place, et conviennent pour le franchissement de petites brèches (portées comprises entre 5 et 20 mètres). Ils sont souvent utilisés pour les passages inférieurs avec une faible épaisseur de remblai. Parmi les solutions fréquemment rencontrées figurent les ponts isostatiques préfabriqués ordinaires (PIPO), les ponts isostatiques coulés en place avec fondations (PICF), ainsi que les ponts en dalle (POD). Certains ouvrages adoptent également des formes voûtées en béton armé, adaptées à des contextes géométriques et géotechniques spécifiques.

##### ▪ Les ponts dalles

Les ponts dalles peuvent être construits en béton armé (portées de 6 à 18 m) ou en béton précontraint (portées de 14 à 30 m).

Ils sont adaptés pour le franchissement de brèches moyennes, qu'il s'agisse de passages supérieurs ou inférieurs.

On rencontre souvent les types suivants : les PSIDA (Ponts Supérieurs Isostatiques à Dalle Armée), les PSIDP (Ponts Supérieurs Isostatiques à Dalle Précontrainte), les PSIDN (Ponts Supérieurs Isostatiques à Dalle Nervurée).

- Les ponts à poutres

Pour le franchissement d'ouvertures de grande portée (supérieures ou égales à 15 mètres), on fait recours aux ponts à poutres.

Dans cette catégorie, on distingue notamment les ouvrages en béton armé, tels que les PSIBA, les PRAD ou encore les ponts à poutres précontraintes par câbles et les ouvrages à poutres métalliques, parmi lesquels figurent les poutrelles enrobées, les poutrelles ajourées précontraintes ainsi que les ponts bipoutres mixtes.

- Différentes parties d'un pont

Un pont se compose généralement de deux grandes parties structurelles :

La superstructure

Elle comprend les éléments assurant la circulation et la répartition des charges :

- Le tablier (surface de roulement),
- Les poutres principales,
- Les trottoirs, bordures et dispositifs de sécurité,
- Les revêtements, joints de dilatation et dispositifs d'étanchéité.

L'infrastructure

Elle regroupe les éléments qui assurent la transmission des charges au sol, à savoir :

- Les culées (appuis d'extrémité),
- Les piles (appuis intermédiaires),
- Et les fondations, qui reportent les efforts vers le sol d'assise.

## II.2. Etudes préliminaires

Le principal objectif de cette étude est d'identifier la solution la plus adaptée parmi les différentes options techniquement possibles, en tenant compte des exigences liées à l'environnement, à l'architecture, aux délais, aux aspects hydrauliques, à l'accès, aux coûts et à la faisabilité. Pour y parvenir, une évaluation multicritère sera réalisée afin de comparer ces options et de sélectionner celle qui répond le mieux aux exigences spécifiques du projet.

Le paramètre fondamental du choix du type d'ouvrage est la portée principale ou portée maximale.

Tableau 1: Gammes de portées des ponts courants

| Type d'ouvrage                                                                            | Gamme de portée             | Élancement           |                      | Observations                                                | Balancement optimal |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|
|                                                                                           |                             | Sur pile             | À la clé             |                                                             |                     |
| Ouvrages mixtes courants (acier/béton)                                                    |                             |                      |                      |                                                             |                     |
| Poutrelles métal enrobées de BA (élancement métal seul)                                   | 10 à 25 m<br>10 à 30 m      | 1/33<br>1/38         | Idem<br>Idem         | Travées indépendantes<br>Travées continues                  | 1.0<br>0.7 à 0.8    |
| P.S.I.P.A.P. Poutrelles ajourées précontraintes transversalement, (élancement métal seul) | < 28 m<br>< 36 m            | 1/38<br>1/38         | Idem<br>Idem         | Travées indépendantes<br>Travées continues                  | 1.0<br>0.7 à 0.8    |
| Ouvrages types en béton construits sur cintre au sol                                      |                             |                      |                      |                                                             |                     |
| P.I.C.F. - P.I.P.O. P.O.D. (Ponts cadres et portiques en BA)                              | < 10-12 m<br>8-10 à 20-22 m | 1/25<br>1/25         | Idem<br>Idem         |                                                             | /                   |
| P.S.I.B.A. (Poutres en BA)                                                                | < 25-30 m<br>< 20-25 m      | 1/15<br>1/20         | Idem<br>Idem         | Travée isostatique<br>Travées continues                     | 1.0<br>0.8          |
| P.S.I.D.A. (Dalles en BA)                                                                 | 6-8 à 18-20 m               | 1/20<br>1/26<br>1/28 | Idem<br>Idem<br>Idem | Travée isostatique<br>Deux travées<br>Trois travées ou plus | 1.0<br>1.0<br>0.8   |

|                                                                |                 |                          |                      |                                                             |                          |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------|
| P.S.I.D.P.<br>(Dalle pleine en BP)                             | 18 à 25-30 m    | 1/25<br>1/28<br>1/33     | Idem<br>Idem<br>Idem | Travée isostatique<br>Deux travées<br>Trois travées ou plus | 1.0<br>1.0<br>0.65 à 0.7 |
| P.S.I.D.P.<br>(Dalles en BP à larges encorbellements)          | 20 à 30-35 m    | 1/22<br><br>1/25<br>1/28 | Idem<br>Idem<br>Idem | Travée isostatique<br>Deux travées<br>Trois travées ou plus | 1.0<br>1.0<br>0.65 à 0.7 |
| P.S.I.D.E.<br>(Dalles élancées en BP)                          | 25 à 35-40 m    | 1/22<br><br>1/25<br>1/28 | Idem<br>Idem<br>Idem | Travée isostatique<br>Deux travées<br>Trois travées ou plus | 1.0<br>1.0<br>0.65 à 0.7 |
| P.S.B.Q. (Ponts à béquilles en BP)                             | 20 à 40 m       | 1/25<br>1/25             | 1/35                 | Trois travées<br>Portée en tête de béquilles                | 0.6                      |
| <b>Ouvrages types à poutres préfabriquées</b>                  |                 |                          |                      |                                                             |                          |
| P.R.A.D.<br>(Poutres préfabriquées à fils ou torons adhérents) | 10-15 à 25-30 m | 1/20                     | Idem                 | Travée isostatique – pré tension                            | Portées égales           |
| V.I.P.P. (Poutres préfabriquées à câbles de précontrainte)     | 30 à 50 m       | 1/17                     | Idem                 | Travée isostatique – post tension                           | Portées égales           |

➤ Choix de structures pour portées moyennes (18 m)

Pour des ouvrages à plusieurs travées de portée intermédiaire, les options suivantes sont envisageables :

- Béton armé :

Ponts-dalles (PSI-DA) avec encorbellements latéraux.

Plusieurs solutions structurelles ont été examinées pour le franchissement étudié. Les ponts à poutres en béton armé constituent une option particulièrement adaptée au contexte local, en raison de leur coût relativement maîtrisé, de la disponibilité des matériaux et de la bonne maîtrise des techniques de mise en œuvre par les entreprises nationales.

Les solutions en béton précontraint, telles que les dalles précontraintes ou les dalles à âme allégée, offrent des performances intéressantes pour les grandes portées. Toutefois, elles nécessitent des moyens techniques et un savoir-faire spécifique, encore peu répandus localement, ce qui implique souvent le recours à des entreprises spécialisées et entraîne une augmentation des coûts.

Les structures mixtes acier-béton, bien que techniquement performantes, ont également été écartées en raison du coût élevé de l'acier et de leur faible compétitivité économique dans le contexte burkinabè.

Au regard de ces éléments, les solutions les plus pertinentes pour le projet étudié restent :

- ❖ Le pont en dalle continue en béton armé ;
- ❖ Le pont à poutres en béton armé.

### II.2.1. Prédimensionnement des variantes

Données fonctionnelles et structurales communes

- L'ouverture à franchir est estimée à environ 52 m.
- L'ouvrage est dimensionné pour porter une chaussée de 7 m de large, composée de deux voies de 3,5 m chacune. Cette chaussée est bordée, d'un côté, par un trottoir de 1,5 m et, de l'autre, par un séparateur mobile de type DBA.
- Le profil en long du tablier adoptera une forme en toit, avec une pente de 2,5 %, permettant d'assurer l'écoulement naturel des eaux de ruissellement.

- Les culées seront constituées de voiles en béton armé, tandis que les piles seront formées de colonnes reliées entre elles par un chevêtre.
- Le tablier recevra un revêtement composé d'une couche d'étanchéité de 3 cm, recouverte par une couche de roulement de 5 cm.

### II.2.2. Équipements de l'ouvrage

Pour améliorer l'exploitation de l'ouvrage, renforcer la sécurité des usagers et garantir une meilleure durabilité, plusieurs équipements seront intégrés :

- Barrières de retenue de type BN4 ;
- Joints de chaussée et de trottoirs placés au droit des appuis ;
- Appareils d'appui en élastomère fretté ;
- Gargouilles de 80 mm de diamètre ;
- Bossages pour la mise en place des appareils d'appui ;
- Corniches préfabriquées en béton armé.

### II.2.3. Prédimensionnement de la variante 1 :

Pont à poutres en béton armé

Profil en long

Les ponts à poutres en béton armé sous chaussée constituent une solution structurelle couramment retenue pour des portées comprises entre 10 et 25 m, avec un optimum économique situé aux environs de 20 m (Calgaro, 2000). Au regard des exigences fonctionnelles de l'ouvrage, des contraintes géométriques du site et des conditions hydrauliques du franchissement, cette typologie a été retenue pour le projet.

Le franchissement de la largeur totale de 52 m est assuré par un tablier continu composé de trois travées, à savoir une travée centrale de 18 m et deux travées latérales de 17 m chacune. Ce découpage en travées permet d'optimiser la répartition des efforts internes, de limiter les portées unitaires dans le domaine d'efficacité du béton armé et de garantir une solution techniquement fiable et économiquement maîtrisée.

Sur la base de l'étude hydraulique et des hypothèses de dimensionnement retenues, notamment en ce qui concerne les niveaux de crue de projet et les hauteurs d'eau maximales, un tirant d'air minimal de 2,00 m a été adopté afin d'assurer la sécurité hydraulique de l'ouvrage et la continuité de l'écoulement en période de hautes eaux.

Les caractéristiques géométriques des appuis sont les suivantes :

**Culées :**

- Voile en béton armé d'une épaisseur de 1 m,
- Hauteur totale de 4 m, reposant sur une semelle de 4 m de largeur et de 1,20 m d'épaisseur.

**Piles :**

Trois colonnes de 0,80 m de diamètre chacune, surmontées d'un chevêtre de 0,80 m × 1,20 m

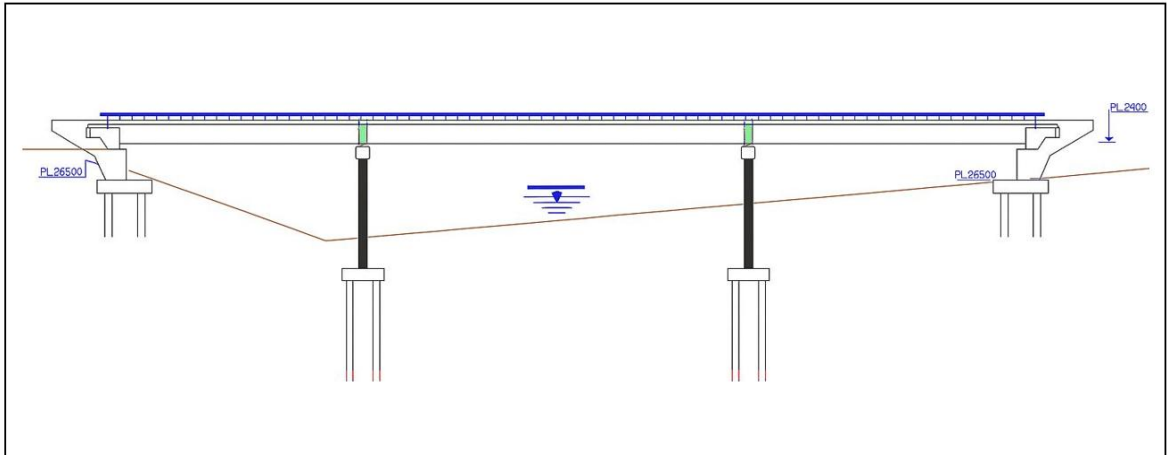


Figure 3: Profil en long de l'ouvrage

**Profil en travers**

Pour éviter les fissurations liées à la position du terre-plein central (TPC), il a été retenu de réaliser deux tabliers distincts.

L'ouvrage se compose ainsi de deux ponts de largeurs respectives 8,5 m et 9,5 m. Le dimensionnement est effectué sur le tablier le plus large (9,5 m), considéré comme représentant le cas le plus défavorable.

Le profil en travers routier sur le tablier se présente comme suit :

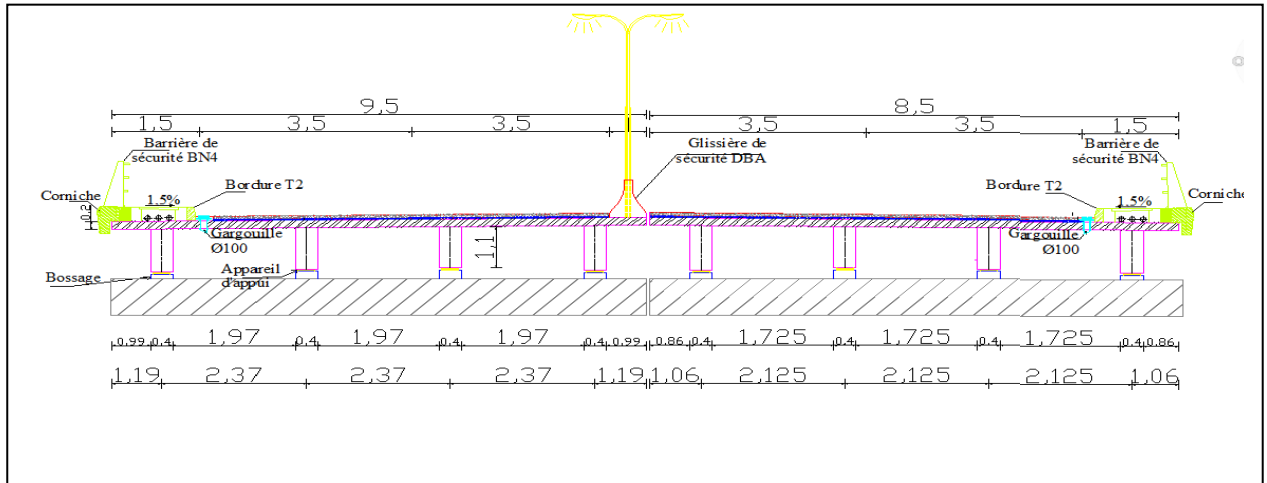


Figure 4: Coupe transversale du tablier de la variante en poutre

### II.2.1. Prédimensionnement de la variante 2 :

#### Pont dalle en béton armé

Les dimensions des appuis retenues pour cette variante sont identiques à celles adoptées dans la solution en béton armé à poutres.

Dans le cas d'un pont en dalle en béton armé, le dimensionnement est généralement conduit à partir de la travée la plus défavorisée, celle-ci étant soumise aux sollicitations maximales en service. Cette approche permet de garantir un niveau de sécurité et de performance satisfaisant pour l'ensemble du tablier.

Les recommandations issues des guides de conception des ouvrages d'art indiquent que, pour un pont dalle en béton armé comportant trois travées d'environ 18 m, l'épaisseur du tablier est couramment estimée à partir d'un rapport entre l'épaisseur structurale et la portée, généralement compris dans un intervalle de l'ordre de 1/18 à 1/20. Donc  $h_t \approx 0,90m$  à  $0,85m$ , une épaisseur de dalle de 0,85m a été retenue pour une configuration à trois travées avec une portée réelle de 18 mètres.

La largeur totale du tablier est de 18 mètres, et la longueur utile de travée est maintenue à  $L = 17,70$  m, en déduisant une zone d'about de 0,30 mètre de chaque côté, conformément aux pratiques courantes.

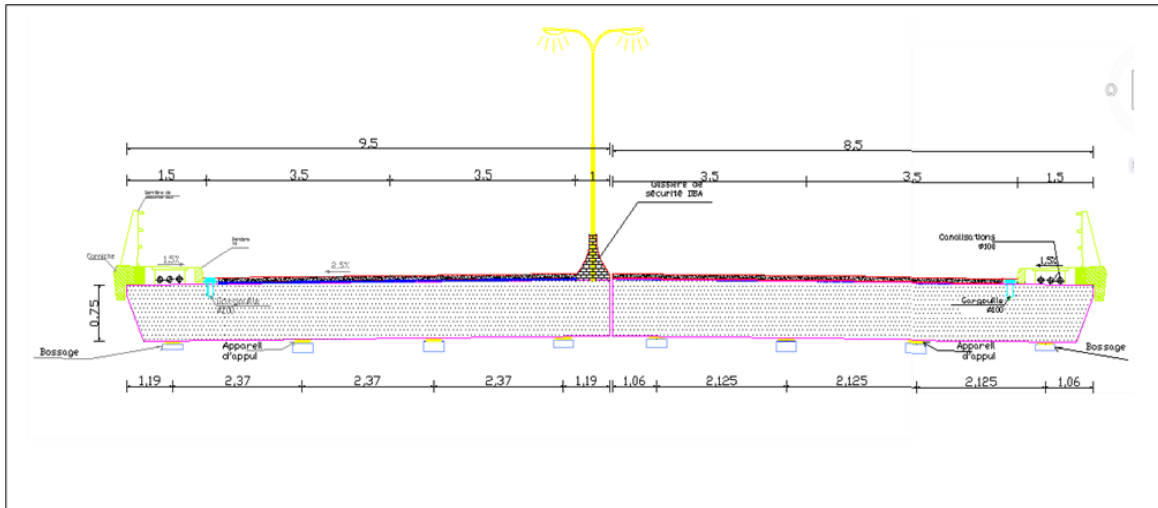


Figure 5: Coupe transversale de la variante en dalle

## II.2.2. Analyse multicritère des deux variantes étudiées

L'attribution des notes pour chaque critère repose sur une analyse comparative qualitative et semi-quantitative des deux variantes étudiées. Les évaluations ont été réalisées à partir des hypothèses de conception retenues, des résultats des études techniques préliminaires (structurelles, géométriques et hydrauliques), ainsi que de données issues de la littérature technique et de retours d'expérience sur des ouvrages similaires.

Pour chaque critère, la notation tient compte des paramètres suivants :

- Les délais de réalisation ont été évalués à partir des méthodes constructives envisagées, notamment la possibilité de préfabrication, la complexité des phases de mise en œuvre et la durée estimative des travaux ;
- Le critère coût a été apprécié sur la base des quantités relatives de béton et d'acier, de la complexité d'exécution, ainsi que des économies ou surcoûts induits par les terrassements et les équipements nécessaires ;
- La faisabilité technique a été notée en fonction de la disponibilité des matériaux, des besoins en main-d'œuvre spécialisée, des moyens matériels requis et du niveau de technicité des travaux ;
- La durabilité et l'entretien ont été évalués au regard du comportement structurel attendu, de la sensibilité aux tassements différentiels, des sollicitations environnementales et de la facilité d'inspection et de maintenance ;

- L'impact environnemental a été apprécié de manière qualitative en considérant les volumes de matériaux mis en œuvre, les nuisances liées au chantier et l'intégration de l'ouvrage dans son environnement ;
- L'aspect esthétique a été évalué en fonction de l'épaisseur du tablier, de la perception visuelle de l'ouvrage et de son intégration paysagère.

L'échelle de notation adoptée varie de 0 à 5, la note 5 correspondant à la solution la plus performante pour le critère considéré.

Les résultats de l'analyse comparative multicritère des deux variantes retenues sont présentés dans le tableau ci-dessous

Tableau 2: Analyse comparative multicritère des deux variantes

| Critère                           | Variante 1 :<br>Pont en BA<br>(poutres<br>préfabriquées)                 |   | Variante 2 :<br>Pont dalle en<br>BA                                        |   | Observations                                              |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---|----------------------------------------------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------|
| <b>Délais</b>                     | Préfabrication possible, gain de temps                                   | 5 | Pas de préfabrication, durée d'exécution plus longue                       | 1 | Avantage net pour la variante 1 grâce à la préfabrication |
| <b>Coût</b>                       | Économie en béton et acier, matériaux courants                           | 5 | Consommation plus importante (+25 à 30%), mais gain en terrassements       | 3 | Variante 1 plus économique                                |
| <b>Faisabilité</b>                | Matériaux disponibles mais main-d'œuvre importante et engins nécessaires | 2 | Exécution simple, économie de main-d'œuvre et coffrage réduit              | 4 | Variante 2 plus favorable                                 |
| <b>Durabilité &amp; entretien</b> | Peu sensible aux tassements différentiels, entretien aisé                | 4 | Plus sensible aux tassements différentiels mais bonne résistance mécanique | 3 | Comportement proche pour les deux variantes               |
| <b>Impact environnemental</b>     | Impact mineur                                                            | 3 | Impact mineur                                                              | 3 | Effets similaires                                         |
| <b>Esthétique</b>                 | Tablier épais, aspect peu                                                |   | Tablier mince, rendu visuel                                                |   | Variante 2 plus esthétique                                |

|              |            |           |                 |           |                          |
|--------------|------------|-----------|-----------------|-----------|--------------------------|
|              | esthétique | 1         | plus harmonieux | 4         |                          |
| <b>Total</b> |            | <b>20</b> |                 | <b>18</b> | <b>Variante 1 adopté</b> |

À l'issue de l'analyse multicritère, la solution retenue pour le franchissement du Massili est un pont à poutres en béton armé. Cette typologie est adaptée aux portées envisagées, permet un coût maîtrisé, assure une durabilité satisfaisante dans le contexte climatique soudano-sahélien, et bénéficie des pratiques locales de réalisation.

Le choix s'appuie sur des données générales concernant le régime pluvial tropical du Massili, les variations saisonnières de débit et de largeur du cours d'eau, ainsi que les sols alluviaux et hydromorphes typiques des vallées. Ces éléments ont permis de définir la solution adaptée tout en anticipant les contraintes principales du site.

### III. PROJET D'OUVRAGE D'ART : ETUDE DETAILLEE

Ce chapitre expose les résultats essentiels relatifs au dimensionnement de la variante choisie. Il détaille les normes et règlements appliqués, les hypothèses de charges considérées, ainsi que les propriétés des matériaux utilisées. Sont également présentés les résultats des calculs permettant de déterminer les dimensions des différentes composantes de l'ouvrage. Une note de calcul détaillée est jointe en annexe (pages lxix) du présent mémoire.

#### III.1. Description de l'ouvrages

Il s'agit d'un pont à poutres isostatiques sous chaussée, destiné à deux voies de circulation. L'ouvrage comporte trois travées disposées comme suit : travée gauche 17,00 m — travée centrale 18,00 m — travée droite 17,00 m, pour une longueur totale de 52,00 m.

Le tablier retenu est une structure en béton armé constituée de quatre poutres longitudinales isostatiques préfabriquées, d'une hauteur de 1,10 m. Ces poutres sont disposées avec un entraxe moyen d'environ 3,17 m et s'étendent sur les trois travées de 17 m, 18 m et 17 m.

Elles supportent un hourdis en béton armé coulé en place, d'une épaisseur de 20 cm, réalisé sur des prédalles servant de coffrage permanent. En ce qui concerne l'entretoisement, chaque travée est équipée de deux entretoises d'about. Les entretoises intermédiaires ont été volontairement supprimées, leur mise en œuvre présentant des contraintes pratiques, comme souligné par Calgaro (2000). Dans cette configuration, le hourdis assure la fonction d'entretoisement transversal et contribue à la stabilité globale du tablier.

Largeur utile du tablier : 9,50 m, répartie comme suit :

Deux voies de circulation de 3,50 m chacune,

Un trottoir de 1,50 m d'un côté et un terre-plein central (TPC) de 1,00 m de l'autre côté.

Les culées en béton armé sont formées comme suit

- Un mur de front qui retient le remblai derrière la culée, surmontée d'un mur garde grève ;
- Des murs en retour solidaires du mur de front et de la semelle ;
- D'une semelle reposant sur une fondation superficielle.
- Une dalle de transition est placée à chaque entrée de l'ouvrage

Aussi la pile est elle aussi en béton armé et constituée de trois colonnes circulaires de 0,70 m de diamètre, d'un chevêtre et d'une nervure respectivement aux extrémités supérieures et inférieures des colonnes.

## III.2. Normes, règlements et notes d'hypothèses générales

### III.2.1. Les Références réglementaires et normes techniques

Le dimensionnement et la vérification des éléments structuraux de l'ouvrage sont effectués conformément aux règlements et instructions en vigueur, notamment

- Règles BAEL 91 révisées 99 : relatives au calcul des structures en béton armé selon la méthode des états limites ultimes et de service.
- Fascicule n°61, Titre II : définissant les programmes de charges et les épreuves applicables aux ponts-routes pour les surcharges routières.
- Fascicule n°62, Titre V : portant sur les règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil.

### III.2.2. Charges de calculs

#### ➤ Charges permanentes

Les poids propres des éléments de l'ouvrage sont les suivants :

- Béton armé : 25 KN/m<sup>3</sup>
- Revêtement en enrobé : 24 KN/m<sup>3</sup>
- Etanchéité : 24 KN/m<sup>3</sup>
- BN4 : 0,75 KN/ml
- Equipements divers : 1,50 KN/ml

#### ➤ Charges d'exploitation

En tenant compte des prescriptions du maître d'ouvrage et de l'usage prévu de l'ouvrage, les charges d'exploitation considérées pour le dimensionnement des divers éléments (conformément au Fascicule 61, Titre II) sont les suivantes :

- Le système de charge A ;
- Le système de charges B ;
- Le convoi militaire Mc120 ;
- Les forces de freinage ;
- Les charges de trottoirs ;
- Les surcharges sur remblai.

### III.2.3. Caractéristiques des matériaux

Les propriétés mécaniques adoptées pour les matériaux de construction sont les suivantes :

- Béton de classe B35 :  
 $f_{c28} = 30\text{MPa}$  ;  $\gamma_b = 1,15$  ;  $f_{tj} = 2,4\text{MPa}$  ; poids volumique :  $25\text{KN/m}^3$
- Acier :  $f_e = 500\text{MPa}$ ,  $\gamma_s = 1,15$

Ces caractéristiques sont uniformément appliquées à l'ensemble des éléments constitutifs du pont.

## III.3. Dimensionnement des éléments du tablier

### III.3.1. Dimensionnement du hourdis

#### III.3.1.1. Modélisation

Le dimensionnement du hourdis est réalisé selon la méthode forfaitaire, en considérant une bande de calcul de largeur 1 mètre. Le hourdis est supposé reposer sur les poutres maîtresses ainsi que sur les entretoises d'about, assurant la transmission des charges vers les éléments porteurs principaux.

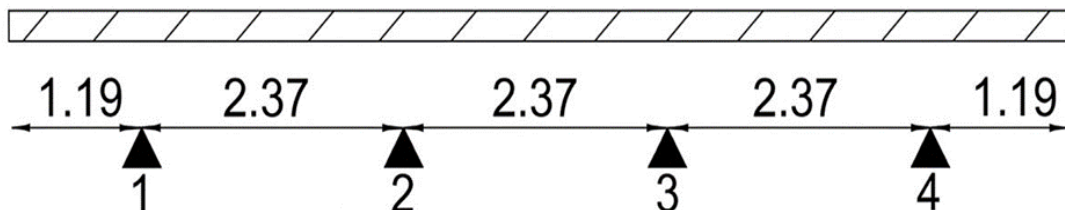


Figure 6: Modélisation du hourdis dans le sens transversal

### III.3.1.2. Evaluation des charges sollicitations

Les charges permanentes appliquées au hourdis proviennent essentiellement du revêtement de chaussée, du système d'étanchéité, ainsi que des autres couches constitutives prévues dans la structure définitive du tablier.  $g_h = \sum g_i = 8,65 \text{ KN/m}^2$ .

#### III.3.1.3. Coefficients de multiplication des charges

- $a_1 = 1$  ET  $a_2 = 1$  car on a un pont de 1ère classe et deux voies chargées
- $b_c = 1,10$  et  $b_t = 1$
- $\delta_{Bh} = 1,59$
- $\delta_{Mh} = 1,34$

#### III.3.1.4. Vérification de non poinçonnement du hourdis

Selon les prescriptions de l'article A.5.2, alinéa 4 du BAEL 91 révisé en 1999, il est nécessaire de s'assurer que le hourdis résiste au poinçonnement provoqué par les charges des roues Br et Bt. Pour cette vérification, on suppose qu'une roue est positionnée au centre d'une portion élémentaire de la dalle, afin d'analyser l'effet local induit.

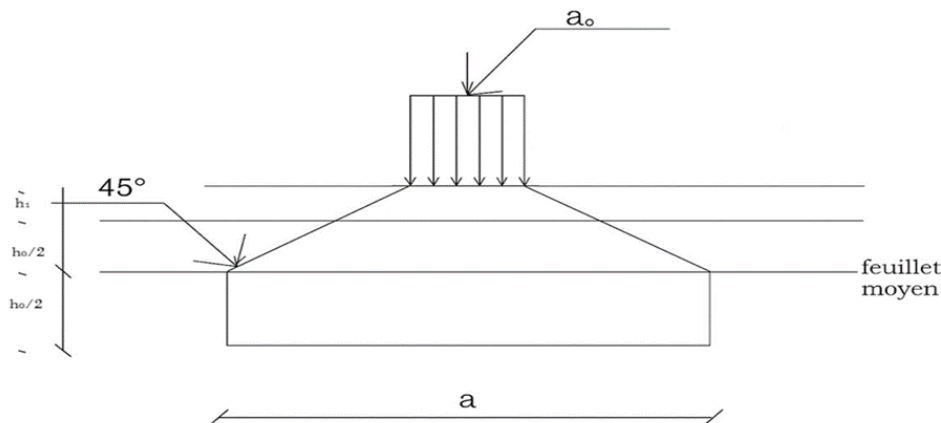


Figure 7: Diffusion des charges localisées dans la dalle

On doit vérifier  $h_0 \geq h_o = \frac{Q_u}{0,045 \times u_c \times f_{c28}}$  avec :

$U_c = \text{périmètre du feuillet moyen} ; U_c = 2(a + b) ;$

$Q_u =$  charge poinçonnant à l'ELU, multipliée par les coefficients  $\delta$ ,  $b_t$  et  $b_c$

$a = h_0 + a_0 + 2\epsilon h_1$  et  $b = h_0 + b_0 + 2\epsilon h_1$

avec  $\epsilon = 0,75$   $h_1 = 0,1 \text{ m}$  et  $h_0 = 0,2 \text{ m}$ .

$a_0 \times b_0$  Correspond au rectangle d'impact ;

$h_0$  est l'épaisseur de la dalle ;

$h_1$  l'épaisseur du revêtement,

$\xi$  est un coefficient dépendant de la nature du revêtement et

$a \times b$  les dimensions du rectangle au niveau du feuillet moyen.

On obtient donc  $h'_{0\max} = 0,037 \leq h_0$  donc le non-poinçonnement du hourdis est vérifié.

### III.3.1.5. Calcul des sollicitations dans un panneau de hourdis isostatique

Le panneau de hourdis est supporté à la fois par les poutres principales et par les entretoises. Ses dimensions sont de  $l_x = 2,16m$  ;  $l_y = 17,2m$ .

#### 1) Sollicitations dues aux charges permanentes

▪ Moment :  $M_{x_g} = \frac{g_h l_x^2}{8} = 5,04 \text{ KN/ml}$  ;  $M_{y_g} = 0 \text{ kN/ml}$

▪ Effort tranchant :  $V_{x_g} = \frac{g_h l_x}{2} = 9,34 \text{ KN/ml}$  ;  $V_{y_g} = 0 \text{ kN/ml}$

#### 2) Sollicitations dues aux charges d'exploitation

Les charges d'exploitations proviennent des effets des systèmes A, B et Mc120.

▪ Charges uniformément réparties sur le hourdis : système A : On considère ici une densité des charges  $A(l) = 230 + 3600/(l + 12)$  avec A la surcharge en daN/m<sup>2</sup>, l= longueur surchargée qui est la portée= 18.00 m. La valeur obtenue est multipliée par les Coefficients  $a_1=1$  et  $a_2=1$ . On obtient donc  $A(l) = 14,30 \text{ kN.m/m}^2$  qui représente donc la charge  $q_A$  ceci nous donne donc

$M_{\max A} = \frac{q_A l_x^2}{8} = 8,34 \text{ KN.m/ml}$  et  $V_{\max A} = \frac{q_A l_x}{2} = 15,44 \text{ KN/ml}$ .

▪ Charges localisées : sous-systèmes Br, Bt et Mc120 :

L'évaluation des sollicitations générées par les charges ponctuelles appliquées sur le hourdis est réalisée, à mi-feuillet, à l'aide des abaques de MOUGIN. Les charges sont positionnées dans la configuration la plus défavorable, c'est-à-dire au centre du panneau. Pour le sous-système Br, l'empreinte de la roue de 10 kN est considérée perpendiculairement à l'axe de la chaussée. Concernant le sous-système Bt, les effets sont déterminés par la superposition des actions produites par les deux roues du tandem (80 kN chacune) placées au centre du panneau. Enfin, pour le convoi Mc120, l'action est modélisée par une chenille de 550 kN centrée sur le panneau. Le tableau présente la synthèse des résultats obtenus.

- 3) Un récapitulatif des sollicitations isostatiques et de leur pondération aux états limites est établi. Pour un panneau de hourdis isostatique, les vérifications sont effectuées à l'ELU pour les efforts tranchants et à l'ELS pour les moments de flexion, conformément aux exigences réglementaires. On obtient donc  $M_{ox} = 66,06 \text{ KN.m/ml}$  ;  $M_{oy} = 22,90 \text{ KN.m/ml}$  et  $V_x = 112,37 \text{ KN/ml}$  ;  $V_y = 89,25 \text{ KN/ml}$ .

### III.3.1.6. Prise en compte de l'hyperstaticité du hourdis :

#### Redistribution des moments

Le calcul du hourdis est effectué selon la méthode forfaitaire, en prenant en compte l'effet de l'hyperstaticité. Celle-ci se traduit par une redistribution des moments : 80 % du moment isostatique est reporté en travée et 50 % sur appuis (CALCARO, 2000). Cette correction met en évidence la continuité structurelle du hourdis dans le sens transversal, alors que dans le sens longitudinal, son comportement reste isostatique. Les valeurs finales des moments de calcul sont ainsi déterminées

$M_{ax} = 33,03 \text{ KN.m/ml}$  et  $M_{tx} = 52,85 \text{ KN.m/ml}$ ,  $M_y = 22,90 \text{ KN.m/ml}$ .

Un calcul d'armatures donne comme ferrailage :

Sens lx : sur appuis 9 HA 14/m et en travée 7 HA 20/m

Sens ly : 6 HA 14/m

### III.3.1.7. Calcul de la partie en encorbellement

L'encorbellement de la dalle est dimensionné au mètre linéaire, en l'assimilant à une console encastrée dans la poutre de rive. Cette modélisation permet de prendre en compte les sollicitations spécifiques induites par les charges appliquées en extrémité de tablier.

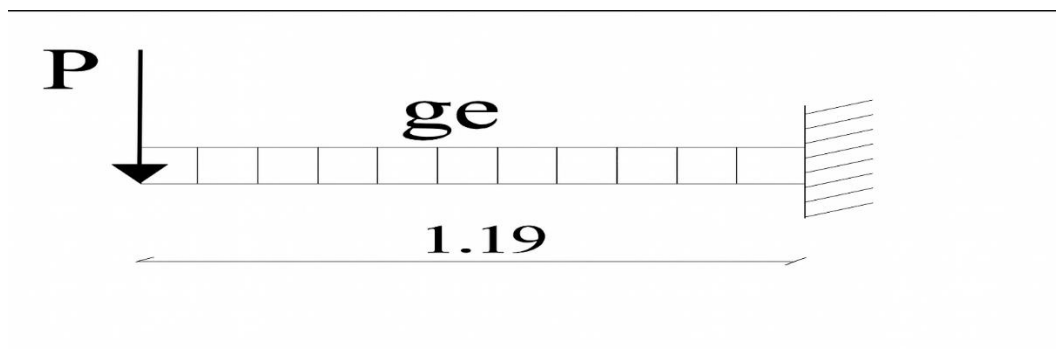


Figure 8: Modélisation de la partie en encorbellements du hourdis

Elle est soumise à la fois à des charges réparties, comprenant le poids propre, le poids du trottoir, les charges de type A et celles des locaux de trottoirs, ainsi qu'à des charges concentrées appliquées à l'extrémité de la travée, telles que les corniches et les barrières de retenue. On a donc  $M = \frac{g_e l^2}{2} + PL$  et  $V = g_e l + P$ .

Les calculs conduisent à des valeurs de moment de service

$M_{ser} = 7,13 \text{ kN}\cdot\text{m}$  par mètre linéaire et d'effort tranchant  $V = 21,10 \text{ kN}$  par mètre linéaire.

Le dimensionnement en béton armé aboutit à un ferrailage de 8 barres HA14 par mètre, les dispositions constructives correspondantes étant présentées dans les plans de ferrailage annexés (annexe pages lx) au présent mémoire.

### III.3.2. Dimensionnement des poutres maitresse

Les poutres constituant le tablier sont sollicitées par des charges permanentes, comprenant leur propre poids, celui des hourdis et des éléments de superstructure, ainsi que par des charges d'exploitation provenant de la circulation routière et des trottoirs. Pour le dimensionnement, le tablier sera considéré comme une poutre simplement appuyée entre deux points : d'un côté sur la culée et de l'autre sur la pile.

#### III.3.2.1. Sollicitations dues aux charges permanentes

On considère que toutes les charges permanentes sont réparties de manière uniforme le long de la poutre. Elles incluent le poids des trottoirs et de leurs bordures, le revêtement, l'étanchéité, les garde-corps, les prédalles, le hourdis ainsi que les retombées des poutres, pour un total de  $g = 47,78 \text{ kN/ml}$ . D'où  $M_{maxG} = 1730 \text{ kN}\cdot\text{m}$  et  $V_{maxG} = 360,03 \text{ kN}$ .

#### III.3.2.2. Sollicitations dues aux charges d'exploitation

Système A : Dans l'analyse des sollicitations, il est supposé que les deux voies de circulation d'une même travée soient chargées simultanément, conformément à une hypothèse sécuritaire visant à majorer les effets internes dans les éléments porteurs.

Système B : Dans le cas du système B, le cas le plus critique est celui correspondant au Bc. La position du convoi produisant les sollicitations maximales est identifiée par l'application du théorème de Barré. Le coefficient de majoration dynamique est ensuite évalué en considérant une situation de circulation simultanée de deux files de camions sur le tablier, représentant un cas de chargement particulièrement

défavorable.

Système Mc120 : Pour le calcul du coefficient de majoration dynamique, un seul véhicule est considéré sur le tablier. Le moment fléchissant maximal se produit lorsque le véhicule est positionné au centre de la travée, tandis que l'effort tranchant maximal se produit lorsque le véhicule est placé à proximité d'un appui.

Charge de trottoirs : Une charge surfacique uniforme de 1,50 kN/m<sup>2</sup> est appliquée sur chacun des trottoirs. Les valeurs correspondantes des moments fléchissants et des efforts tranchants non pondérés ont été déterminées et consignées dans un tableau récapitulatif, servant de base aux vérifications ultérieures.

Tableau 3: Sollicitations dues aux charges d'exploitation (non pondérées)

| type de chargement | M (KN.m) | T (KN) |
|--------------------|----------|--------|
| AL                 | 577,15   | 128,7  |
| Trottoir           | 93,125   | 23,25  |
| Bc                 | 243,80   | 362,48 |
| Mc120              | 3340,81  | 915,99 |

### III.3.2.3. Répartition transversale par la méthode de GUYON-MASSONNET

Pour calculer les efforts dans chaque poutre, plusieurs méthodes sont envisageables. Nous adoptons la méthode de GUYON-MASSONNET, adaptée aux tabliers dépourvus d'entretoises intermédiaires. Cette approche consiste à remplacer l'ouvrage réel par une structure continue possédant une rigidité équivalente. Le comportement de la structure dépend essentiellement de deux paramètres : le paramètre de torsion et le paramètre d'entretoisement (MASSONNET, 1962). Une fois ces valeurs connues, les tables de MASSONNET permettent de déterminer les moments dans chaque poutre grâce au coefficient de répartition transversale  $k$

Le moment de chaque poutre s'obtient en multipliant le moment correspondant par ce coefficient  $k$ .

Les combinaisons dimensionnantes sont les suivantes :

ELS :  $G + \max (1,2\max (A ; B) ; Mc120) + 1,2Trottoir$  ;

ELU :  $1,35G + \max (1,6\max (A ; B) ; 1,35Mc120) + 1,6Trottoir$

Les sollicitations sont maximales valent :  $M_{ser} = 3567,10 \text{ kN.m/ml}$  et  $V_U = 638,31 \text{ kN}$

### III.3.2.4. Calcul des armatures et ferrailage

Le calcul des armatures de flexion est réalisé à l'État Limite de Service (ELS), dans le cas d'une fissuration jugée préjudiciable, tandis que le dimensionnement des armatures d'effort tranchant est conduit à l'État Limite Ultime (ELU). La section analysée est assimilée à une section en T, caractérisée par une hauteur totale  $h = 1,30$  m, une largeur d'âme  $b_0 = 0,40$  m, et une table de compression de largeur définie conformément aux dispositions géométriques de l'ouvrage  $b = 2,37$  m et de hauteur  $h_0 = 0,20$  m.

Le calcul des armatures longitudinales principales conduit à l'utilisation de 16 HA 40, tandis que les armatures transversales sont constituées de cadres HA 8 et d'étriers espacés tous les 16 cm.

### III.3.3. Justification des entretoises

Situées aux extrémités de la travée, les entretoises supportent, en plus de leur propre poids et de celui du hourdis, les efforts transmis par les vérins lors du remplacement des appareils d'appui. Elles doivent également être vérifiées sous l'effet d'une roue isolée Br et sont considérées comme semi-encastées sur les poutres principales.

Après le calcul du moment maximal isostatique  $M_0$ , la redistribution se fait en prenant  $0,8M_0$  en travée et  $0,5M_0$  sur appuis (CHARON, 1986).

Les sollicitations obtenues sont les suivantes :

Tableau 4: Sollicitations dans l'entretoise en fonction des cas de charges

| Désignation | $M_{ser_{min}}$ (kN.m) | $M_{ser_{max}}$ (kN.m) | $V_{u_{min}}$ (kN) | $V_{u_{max}}$ (kN) |
|-------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| Travée      | -52,79                 | 84,58                  |                    |                    |
| Appuis      | -53,61                 | 33,27                  | -196,21            | 133,89             |

Le dimensionnement des armatures prévoit l'utilisation de 3 barres HA 25 pour les armatures principales, supérieures et inférieures, tandis que les efforts tranchants sont repris par des cadres et des étriers HA 8 espacés tous les 40 cm.

Les plans d'exécution sont joints en annexe (pages lxiii) du présent document

## III.4. Dimensionnement des éléments de la pile

La pile est constituée de trois colonnes circulaires, solidarisées à leur partie supérieure par un chevêtre, assurant la répartition des efforts provenant du tablier. L'ensemble repose sur



### III.4.1.2. Déterminations des armatures

Le dossier PP 73 recommande d'utiliser des aciers identiques pour les armatures supérieures et inférieures. Les calculs effectués en considérant uniquement une travée chargée donnent des valeurs d'acier nettement inférieures à celles obtenues lorsque les deux travées sont sollicitées simultanément. C'est donc cette dernière hypothèse qui a été retenue, avec la mise en place de 8 barres HA 20 pour les armatures inférieures et de chapeau, ainsi que des barres HA 10 espacées tous les 40 cm pour les armatures transversales.

### III.4.2 Etude des colonnes

Les trois colonnes, d'un diamètre de 70 cm, ont pour fonction de soutenir et de transmettre les charges provenant du chevêtre jusqu'à la fondation. Elles seront donc conçues principalement pour résister à la compression. Outre leur propre poids, elles reprennent également les efforts transférés par le chevêtre. La colonne centrale, étant la plus sollicitée, servira de référence pour le dimensionnement aux états limites ultimes (ELU), elle sera soumise à une sollicitation maximale  $N_u = 2329,49 \text{ KN}$ . À l'issue du calcul des armatures, il a été constaté que la section d'acier obtenue est supérieure à la section minimale requise. En conséquence, le ferrailage finalement adopté correspond à la disposition réglementaire la plus adaptée, garantissant à la fois la sécurité structurelle et une mise en œuvre rationnelle aux dispositions minimales du PP 73 :

Armatures verticales :  $A_v = \max(20\text{cm}^2; 0,2\%B)$  Avec B=section de la colonne d'ou

Armatures horizontales :  $A_h = 0,05\%B$

Au final, les armatures sont donc 12 HA 16 comme armatures principales et des cerces HA 12 tous les 40 cm comme armatures transversales.

### III.4.3 Etude de la semelle

#### III.4.3.1. Prédimensionnement et dimensionnement des semelles

Prédimensionnement

Pieux Ø80 ; l'espacement minimum entre deux files est égal à  $2,5\phi = 2\text{m}$  ; nous prendrons 2,20m.

Semelle :

- Largeur =  $5\phi = 5 \times 0,80 = 4\text{m}$

- Epaisseur :  $1,4\phi = 1,4 \times 0,80 = 1,12$  mais nous retenons  $E = 1,20\text{m}$

- Longueur = 8,2m

#### Dimensionnement des semelles

La semelle de liaison est calculée selon le principe du tirant, et l'effort normal total qu'elle reçoit du fût est exprimé par :  $N = 2329,49 \text{ Kn}$ .

Pour le calcul du ferrailage de la semelle de liaison, on adopte la méthode des bielles et tirants. La force de traction dans le tirant est alors déterminée par

$$T = \text{Max} \left[ N_1 \frac{d_1 - a_1}{z} ; N_2 \frac{d_2 - a_2}{z} \right]$$

$$A_t = \frac{T_{ys}}{f_e} = 33,48 \text{ cm}^2/\text{ml} ; \text{ Soit } 7 \text{ HA } 25 / \text{ml de longueur de la semelle.}$$

✓ On détermine les armatures longitudinales inférieures avec un ratio de 0,1% de la section transversale de la semelle, donc  $41 \text{ cm}^2$  ; on prend alors 9 HA 25

✓ Les armatures longitudinales supérieures sont déterminées avec un ratio de 0.05 % de la section transversale de la semelle, donc  $A_s = 32 \text{ cm}^2$  ; on prend 7 HA25.

#### III.4.3.2. Calcul de la capacité portante des fondations à partir des essais au pressiomètre Menard

##### ❖ Calcul de la contrainte limite de pointe

Les fondations profondes sont constituées de pieux forés avec tubage, une technique permettant d'assurer la stabilité du forage et la qualité du bétonnage. La contrainte de rupture du sol est déterminée à partir de l'expression réglementaire correspondante, tenant compte des caractéristiques géotechniques du terrain.

$q_{pu} = K_p \times p_{le}^*$  Avec  $p_{le}^*$  : pression limite nette équivalente et  $K_p$  : facteur de portance donnée = 1,8.

##### Calcul de la pression limite nette équivalente

La pression limite est donnée par :

$$P_{le}^* = \frac{1}{b+3a} \int_{D+b}^{D+3a} P_l^*(z).dz \text{ avec } b = \min\{a, h\}$$

$P_l^*(z)$  est obtenue en joignant par des segments de droites sur une échelle linéaire les différentes  $p_{l}^*$  mesurées.

Les équations des segments de droite dans notre projet sont :  $Z+10$  ;  $3(Z-2)$  et  $-5Z+66$ .

On obtient donc :  $P_{le}^* = 1,256 \text{ MPa}$  et  $q_{pu} = 1,8 \times 1,256 = 2,2608 \text{ MPa}$  L'effort limite

de pointe :  $Q_{pu} = \rho_p \times A \times q_{pu} = 1 \times \pi \times 0,8^2 \times \frac{2,260}{4} = 1,136 \text{ MN} = 113,6 \text{ T}$

❖ Calcul de l'effort limite par frottement  $Q_{su}$

$Q_{su} = \rho_s \times P \times \sum q_{si} \times ei$  On obtient alors :

$$Q_{su} = 1 \times \pi \times (0,03 + 0,11 + 0,096) = 0,593 MN = 59,3 T$$

❖ Effort limite en compression des pieux  $Q_c$  (capacité portante)

$$Q_c = Q_{pu} + Q_{su} = 113,6 + 59,3 = 172,9 T$$

A l'ELU :  $Q_{cu} = Q_c / 1,40 = 123,5 T$ .

L'effort maximal sur les pieux  $N_{pu} = 943485,34 \text{ daN} = 943,485 T$ . Ainsi donc on obtient 8 pieux disposés en 2 files de 4 pieux fichés sur 8,40 m.

❖ Ferrailage des pieux

Les pieux seront dimensionnés pour une compression centrée. Leur longueur est de 8,40 m et ils sont supposés encastrés à leurs extrémités, tant au niveau du sol qu'au niveau de la semelle. Le calcul des armatures conduit à retenir 12 barres HA10 pour l'armature longitudinale, complétées par des armatures transversales HA8 espacées de 15 cm.

### III.5. Dimensionnement des éléments de la culée

La culée, qui constitue l'appui rive de l'ouvrage, assure avant tout une fonction structurelle. Elle a pour mission de transférer au sol de fondation les actions verticales et horizontales qui lui sont appliquées. Par ailleurs, elle doit également garantir la continuité et l'accessibilité du tablier.

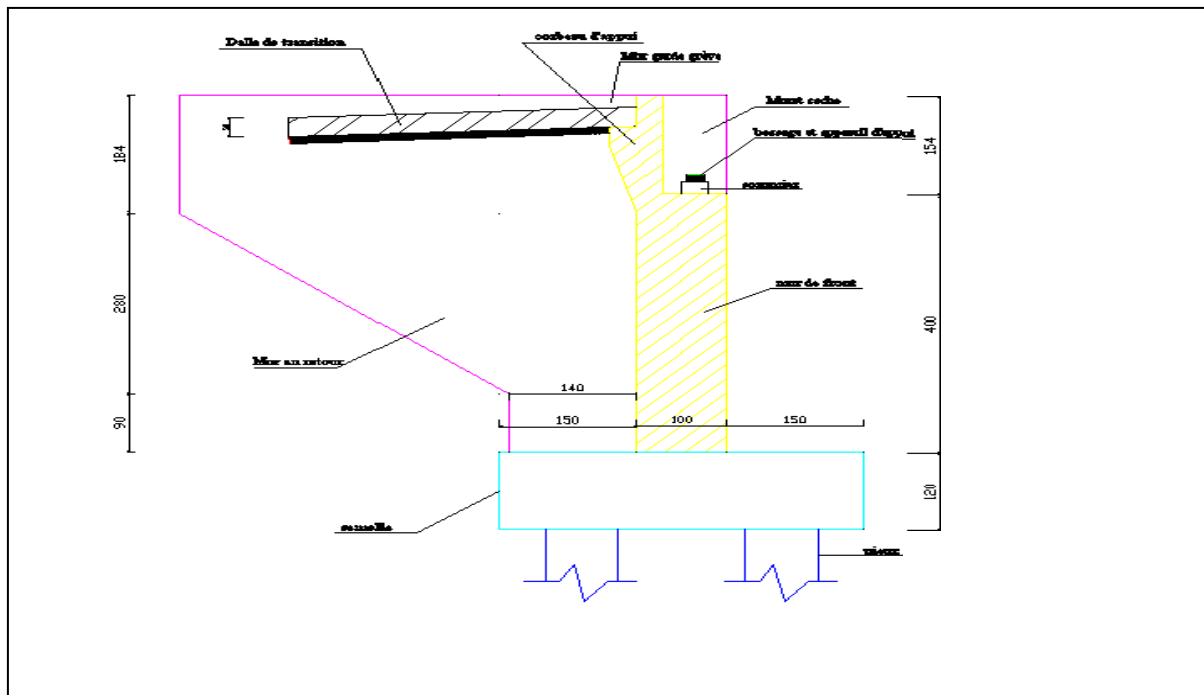


Figure 10: Nomenclature et géométrie de la culée de l'ouvrage projeté

### III.5.1. Vérification de la stabilité externe de la culée

Cette vérification est réalisée conformément à l'article B.3 du Fascicule 62 – Titre V. Elle consiste à contrôler la stabilité de la culée vis-à-vis des principaux modes de rupture, à savoir le poinçonnement, le glissement et le renversement. La méthodologie appliquée est détaillée ci-après. Etat limite de mobilisation du sol support : capacité portante du sol

La vérification consiste à s'assurer que les contraintes exercées par la semelle de la culée sur le sol de fondation restent inférieures à la contrainte admissible de ce dernier. Ce contrôle est effectué à l'état limite ultime (ELU), lorsque l'ouvrage est en exploitation.

On doit avoir ;  $q'_{ref} \leq q'_{lim} = \frac{1}{\gamma_q}(q'_u - q'_0)i_{\delta\beta} + q'_0$  où

$q'_{ref}$  : pression de contact effective de référence sous la semelle (kPa),

$q'_{lim}$  : pression limite admissible du sol à l'ELU (kPa),

$q'_u$  : pression de rupture du sol (kPa),

$q'_0$  : pression initiale dans le sol avant chargement (kPa),

$\gamma_q$  : coefficient partiel de sécurité appliqué à la résistance du sol,

$i_{\delta\beta}$  : coefficient de réduction tenant compte de l'inclinaison de la charge et de la pente du terrain.

$q'_{ref} = \frac{\sigma_{min} + 3\sigma_{max}}{4}$  ; les pressions aux extrémités de la semelle sont alors données par :  
 $\sigma_{min} = \frac{R_v}{B_s} \left(1 - 6 \frac{|e|}{B_s}\right)$  ;  $\sigma_{max} = \frac{R_v}{B_s} \left(16 + \frac{|e|}{B_s}\right)$  ;  $e = \frac{L_s}{2} - \frac{\Sigma M_o}{R_v}$  ;  $i_{\delta\beta} = \left(1 - \frac{\delta}{90}\right)^2$  ou  $\delta$  est l'inclinaison de la résultante par rapport à la verticale et  $\gamma_q = 2$  à l'ELU (Fascicule 62, Titre V, Article B.3.1)

$e$  : excentricité de la résultante (m),

$L_s$  : longueur de la semelle (m),

$\Sigma M_o$  : moment total au bord de la semelle (kN·m),

$R_v$  : résultante verticale des efforts (kN),

$B_s$  : représente la largeur de la semelle (m).

#### III.5.1.1. Etat limite ultime de glissement

La vérification du renversement est effectuée durant la phase de construction, c'est-à-dire avant la mise en place du tablier. À ce stade, les sollicitations horizontales susceptibles d'entraîner un glissement doivent être compensées par la résistance au frottement mobilisée à l'interface entre la semelle et le sol, conformément aux dispositions de l'article B.3.4 du Fascicule 62. Il importe de souligner que le poids propre du tablier ainsi que les surcharges d'exploitation, bien qu'absentes durant la phase de construction, doivent être intégrées dans les phases ultérieures de calcul, en particulier lors des vérifications en exploitation, afin d'assurer un comportement satisfaisant de l'ouvrage sur toute sa durée de service.

#### III.5.1.2. Etat limite ultime de renversement

La vérification au glissement est également effectuée durant la phase de construction. À ce stade de l'étude, les actions horizontales susceptibles de générer des moments de renversement doivent être identifiées et prises en compte avec attention, afin de garantir la stabilité globale de l'ouvrage face aux sollicitations transversales. Être équilibrées par les moments stabilisateurs développés par la structure et son interaction avec le sol de fondation,

conformément aux dispositions de l'article B.3.2 du Fascicule 62. Cette approche permet d'assurer la stabilité globale de l'ouvrage avant la mise en place définitive du tablier.

### III.5.2. Vérification de la stabilité interne : étude structurale des éléments de la culée

Le calcul des sollicitations internes dans les différents éléments constitutifs de la culée, ainsi que la détermination des armatures correspondantes, ont été réalisés à l'État Limite de Service (ELS), conformément aux exigences normatives en vigueur.

#### III.5.2.1. Mur de front

Le dimensionnement des armatures du mur de front a été réalisé en considérant la phase de construction sans la présence du tablier. En dehors des efforts de compression générés par son propre poids et celui des murets — généralement négligés —, le mur de front est principalement sollicité par un moment fléchissant dû à la poussée des terres et aux surcharges appliquées sur le remblai d'accès. Il est analysé comme un mur de soutènement encastré dans la semelle, conformément aux recommandations de l'ADETS (2005). Le couple solliciteur obtenu est le suivant :

- Effort normal :  $N_{\text{ser}} = 122,5 \text{ kN}$
- Moment fléchissant :  $M_{\text{ser}} = 439,11 \text{ kN}\cdot\text{m/ml}$

Le calcul, effectué en section partiellement comprimée, a conduit à un ferrailage constitué de 6 HA 25/ml.

#### III.5.2.2. Semelle

Le dimensionnement de la semelle a été effectué en considérant une flexion simple, avec contrôle de la fissuration susceptible d'altérer la durabilité de l'ouvrage. Elle est supposée encastrée de part et d'autre dans le mur de front, et l'analyse a été menée en phase de service. Les différentes zones de la semelle le patin et le talon sont sollicitées par un moment fléchissant résultant des pressions exercées par le sol, des surcharges appliquées sur le remblai, du poids propre des terres ainsi que de celui de la semelle elle-même. Les calculs ont permis d'obtenir un moment de service de  $M_{\text{ser}} = 303 \text{ kN}\cdot\text{m/ml}$  pour le patin et  $M_{\text{ser}} = 270 \text{ kN}\cdot\text{m/ml}$  pour le talon.

Les armatures correspondantes, déterminées pour garantir la sécurité et la limitation des déformations, sont fixées à 5 HA 25/ml pour chacun des deux éléments.

#### III.5.2.3. Mur garde grève et corbeau d'appui

Le mur garde-grève a pour fonction principale d'assurer la séparation structurelle et fonctionnelle entre le remblai d'accès et le tablier de l'ouvrage. Quant au corbeau d'appui, il est conçu pour recevoir et transmettre les charges issues de la dalle de transition vers la culée.

Le schéma de ferrailage adopté est conforme aux prescriptions du PP73 – Fascicule 132, tant pour le corbeau que pour le mur garde-grève. Cette conformité est notamment vérifiée dans le cas où la hauteur du mur demeure inférieure à 1 mètre, assurant ainsi une cohérence structurelle et une homogénéité des dispositions constructives.

#### III.5.3. Etude de la dalle de transition

La dalle de transition, de largeur identique à celle de l'ouvrage ( $L_d = 9,5$  m), assure la liaison progressive entre le tablier du pont et le remblai d'accès, contribuant ainsi à la continuité de la chaussée et au confort de circulation. Son dimensionnement a été conduit conformément aux prescriptions du SETRA énoncées dans le guide « *Dalles de transition des ponts-routes – Technique et réalisation* » (édition d'octobre 1984).

Dans le cadre de l'étude, la dalle a été assimilée à une poutre simplement appuyée, reposant d'une part sur le corbeau d'appui et d'autre part sur le remblai compacté. Elle est soumise aux surcharges engendrées par le système d'essieux tandem de type Bt, correspondant à la situation de chargement la plus défavorable. Les vérifications ont été conduites à l'État Limite Ultime (ELU) afin de s'assurer de la résistance et de la durabilité de l'élément. Les calculs ont conduit à un moment fléchissant maximal de

$M_u = 89,06$  kN.m par mètre linéaire, pour lequel un ferrailage longitudinal composé de 9 barres HA14 par mètre a été retenu, garantissant une capacité portante suffisante et une maîtrise des déformations.

### III.5.4. Etude des murs en retour

Les murs en retour assurent la stabilité des remblais d'accès en jouant le rôle de structures de soutènement. Leur conception prévoit un encastrement à la fois dans le mur de front et dans la semelle de la culée, garantissant ainsi une continuité structurelle et une meilleure résistance aux sollicitations. Ce dispositif a été retenu de préférence aux murs en ailes désolidarisés, du fait de sa supériorité en matière de stabilité globale (CALGARO, 2000).

En plus de leur poids propre, ces murs sont soumis aux poussées des terres de remblai ainsi qu'aux surcharges appliquées en surface. Les murs en retour adoptés présentent une épaisseur uniforme de 40 cm.

Le dimensionnement des armatures verticales est réalisé en flexion simple, en considérant un encastrement du mur en retour dans la semelle. Les sollicitations de service obtenues sont :

$$\text{Moment fléchissant : } M_{\text{ser}} = 210,64 \text{ kN} \cdot \text{m/ml}$$

$$\text{Effort normal : } N_{\text{ser}} = 55,4 \text{ kN}$$

Il en résulte un ferrailage longitudinal de 8 HA25/m.

Le dimensionnement des armatures horizontales a été effectué en considérant un état de flexion simple, en supposant un encastrement du mur en retour dans le mur de front. Afin de prendre en compte la variation progressive des poussées des terres en fonction de la profondeur, le mur a été décomposé en tranches horizontales, chacune faisant l'objet d'un calcul spécifique et indépendant. Sur la base des sollicitations obtenues, les dispositions d'armatures suivantes ont été retenues : sept barres HA16 pour chacune des deux tranches supérieures, tandis que la tranche inférieure est armée par quatre barres HA14 par mètre linéaire, correspondant aux efforts plus élevés dans cette zone. Par ailleurs, une armature minimale de répartition d'une section de  $3,24 \text{ cm}^2$  par mètre linéaire a été disposée sur les autres faces de l'ouvrage. Cette armature contribue à la limitation des fissurations et assure une meilleure répartition des contraintes au sein du béton.

### III.5.5. Etude des appareils d'appuis

Le tablier est porté par les piles et les culées au moyen d'appareils d'appui assurant la transmission simultanée des efforts verticaux et horizontaux, tout en permettant les rotations liées aux charges d'exploitation et aux déformations structurelles (SETRA, 2007). Pour l'ouvrage considéré, le choix s'est porté sur l'utilisation d'appuis en élastomère fretté de type B, munis de frettages intermédiaires. Ce dispositif permet d'assurer à la fois la transmission des efforts verticaux et l'absorption des déplacements relatifs entre le tablier et les appuis, tout en garantissant un comportement satisfaisant face aux sollicitations horizontales

Le dimensionnement de ces dispositifs est réalisé conformément aux prescriptions du guide du SETRA intitulé « Appareils d'appui en élastomère fretté – Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires » (édition d'octobre 2007). Les appuis finalement retenus sont du type B  $250 \times 300$  ;  $5(8+3)$  ;  $2 \times 5$

### III.6. Modélisation sous Autodesk Robot Structural Analysis

La modélisation numérique a été réalisée afin de reproduire au mieux le comportement réel de l'ouvrage sous sollicitations statiques et dynamiques. Cette étape constitue une phase essentielle du processus de dimensionnement, car elle permet d'obtenir les efforts internes nécessaires au calcul des armatures, ainsi qu'à la vérification des états limites de service (ELS) et ultimes (ELU).

Dans le cadre de ce projet, l'analyse globale de l'ouvrage a été réalisée à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2025, basé sur la méthode des éléments finis. L'utilisation de cet outil permet de représenter de manière réaliste le comportement mécanique de la structure, en assurant une distribution cohérente des charges, une modélisation fiable des conditions d'appui et une évaluation précise des réponses structurales sous différentes sollicitations.

#### III.6.1. Présentation du logiciel Robot Structural Analysis

Autodesk Robot Structural Analysis Professional est un outil dédié à l'analyse des structures de génie civil. Il applique la méthode des éléments finis (MEF) permettant de discrétiser l'ouvrage en éléments simples (barres, plaques, nœuds), facilitant ainsi le traitement et la résolution des équations mécaniques.

Le logiciel Autodesk Robot Structural Analysis met à disposition un ensemble de fonctionnalités particulièrement adaptées à l'étude des ouvrages d'art. Il permet notamment la modélisation détaillée de la géométrie de la structure, la prise en compte de son comportement tridimensionnel, l'application des charges permanentes et variables, ainsi que la génération automatique des combinaisons de calcul. Il offre également des outils de post-traitement graphique facilitant l'analyse des déformations et des sollicitations internes, en plus de modules dédiés au dimensionnement des éléments en béton armé.

### III.6.2.Modélisation

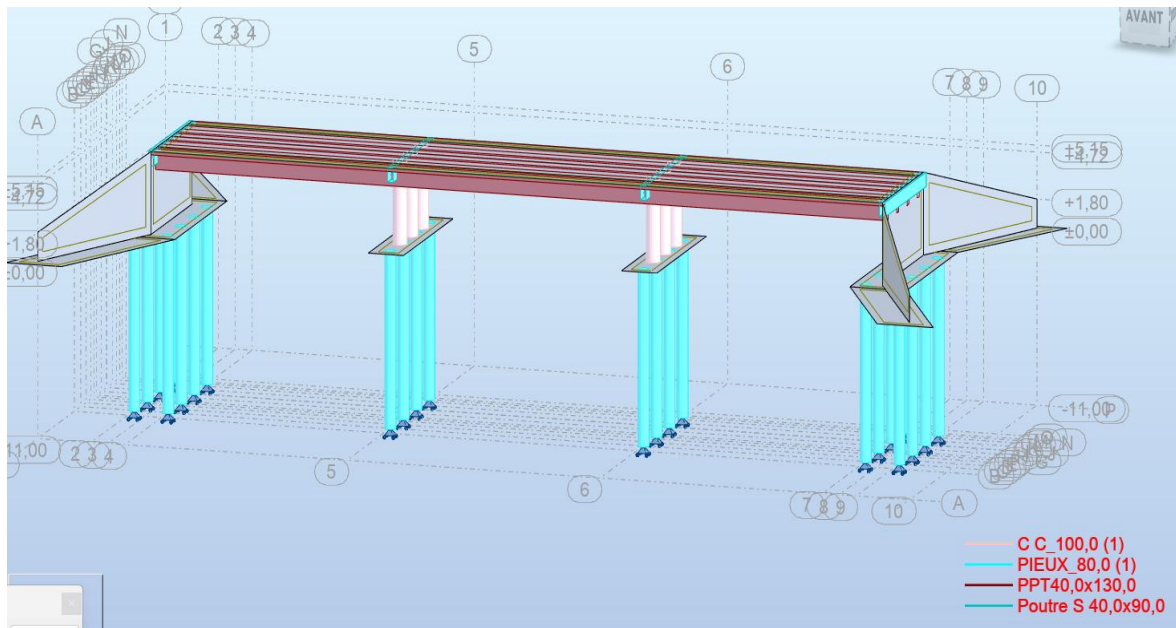
La modélisation consiste à représenter, dans le logiciel, l'ensemble des composantes de la superstructure tout en conservant les caractéristiques géométriques et mécaniques définies préalablement. L'ouvrage étudié est un pont à poutres constitué de trois travées, dont le tablier est formé d'une dalle portée par un système de poutres longitudinales. La dalle est modélisée sous forme de panneaux reposant sur des appareils d'appui convenablement positionnés au droit des culées et piles.

Le dimensionnement des éléments porteurs de l'ouvrage a été conduit à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis, en conformité avec les règlements de calcul retenus pour le projet. Cette phase a consisté à vérifier la capacité résistante des poutres, du tablier et des appuis face aux efforts issus de l'analyse globale, et à déterminer les sections et dispositions d'armatures nécessaires afin de garantir la sécurité structurale et la durabilité de l'ouvrage.

La modélisation comprend les étapes suivantes :

- ✓ Définition de la géométrie générale de l'ouvrage ;
- ✓ Conception structurelle du tablier et des appuis ;
- ✓ Caractérisation des matériaux (béton et acier) ;
- ✓ Définition des appuis et conditions aux limites ;
- ✓ Choix de la méthode de calcul ;
- ✓ Définition des cas de charges permanentes et d'exploitation ;
- ✓ Génération des combinaisons de calcul ;
- ✓ Vérification des résultats et dimensionnement du tablier.

Les appuis ont été assimilés à des appareils simples rectangulaires afin de limiter les concentrations de moments et d'efforts tranchants, et d'obtenir des réactions structurales plus représentatives



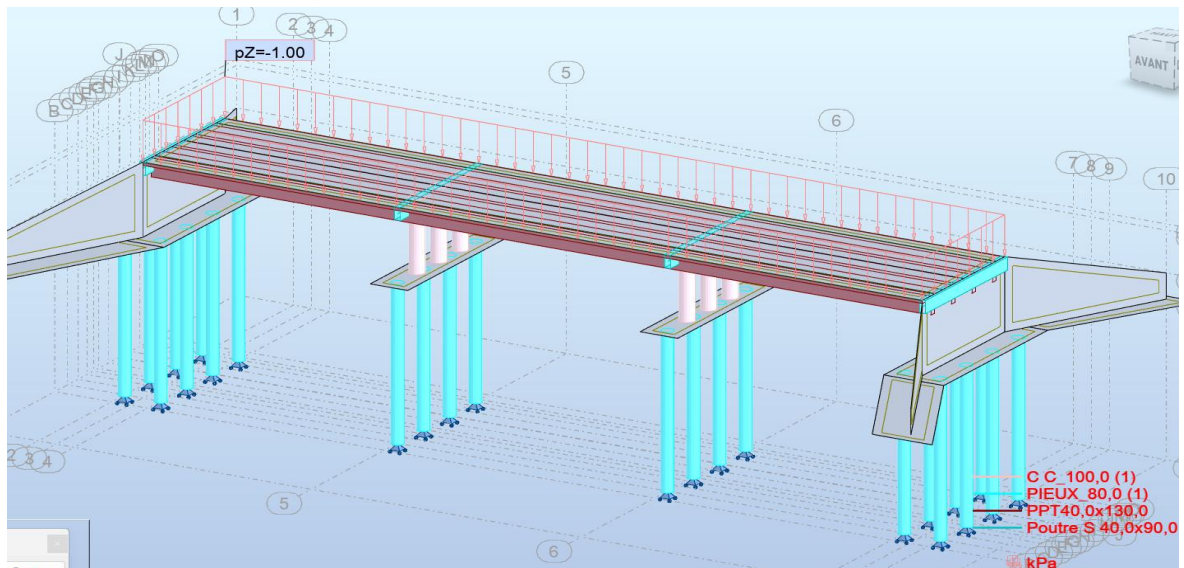
### III.6.3. Application et combinaison des charges – Analyse des sollicitations

L'analyse structurelle du pont débute par la définition et l'application des charges agissant sur l'ouvrage, étape essentielle pour reproduire fidèlement son comportement réel sous exploitation. Cette phase est réalisée dans le logiciel Autodesk Robot Structural Analysis, en cohérence avec la modélisation géométrique et les hypothèses mécaniques retenues.

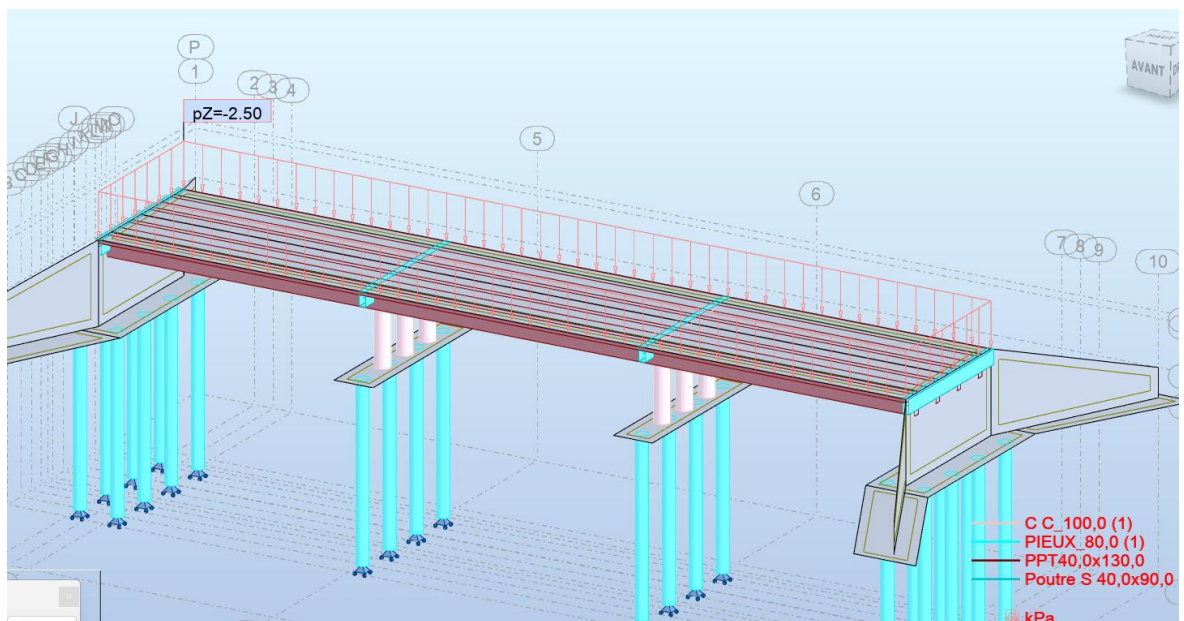
#### Définition et classification des charges

Dans un premier temps, les charges appliquées à l'ouvrage sont identifiées et introduites de manière distincte. Elles comprennent principalement :

Les charges permanentes (G), regroupant le poids propre du tablier, des poutres principales, des équipements fixes, ainsi que les charges liées aux couches de roulement et aux dispositifs annexes ;



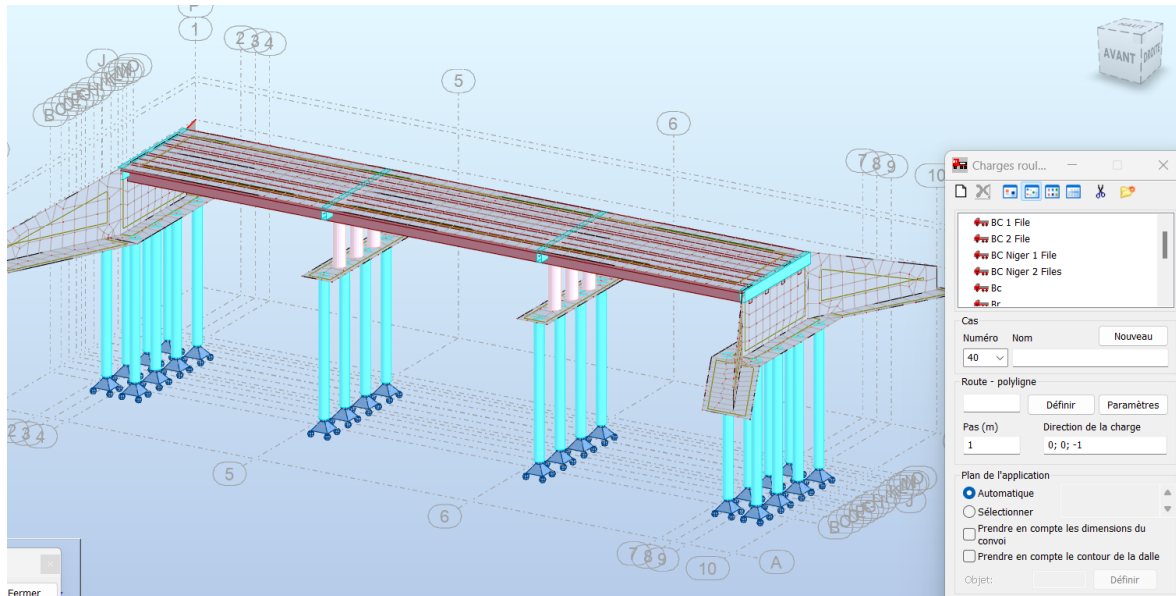
Les charges d'exploitation (Q), correspondant aux actions dues au trafic routier, appliquées conformément aux prescriptions réglementaires en vigueur.



Les actions appliquées à la structure ont ensuite été organisées selon leur nature, en distinguant les charges permanentes, les charges variables usuelles et les charges d'exploitation spécifiques. Cette classification permet une prise en compte méthodique et rigoureuse de chaque type de sollicitation dans les différentes étapes de calcul et de vérification.

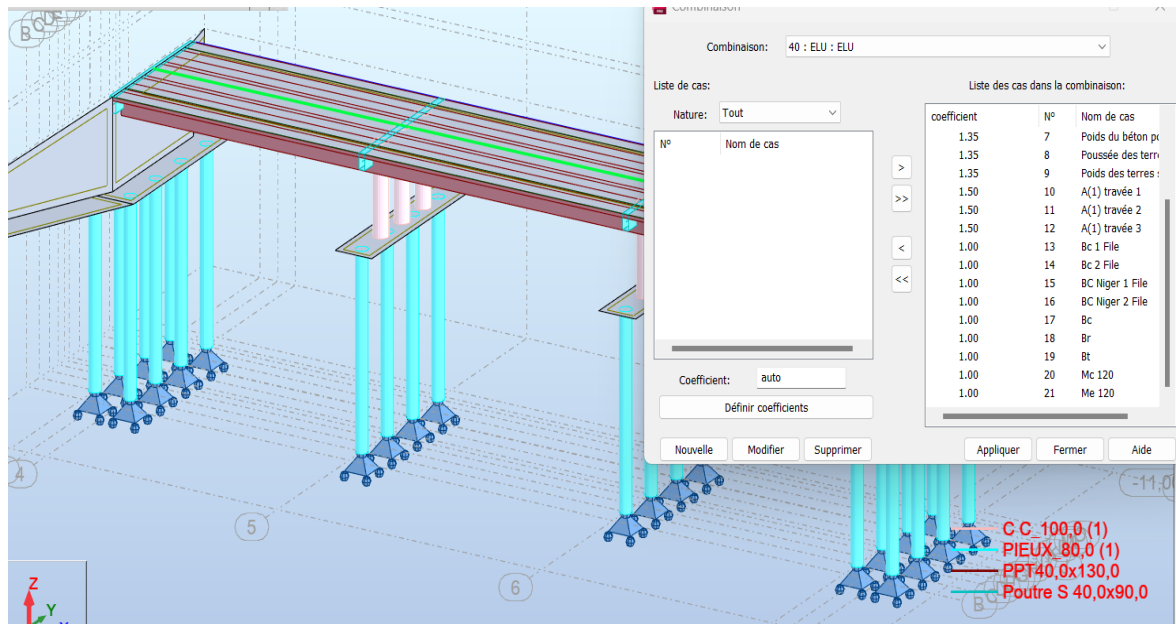
Prise en compte des convois de trafic

Conformément aux exigences normatives applicables aux ouvrages d'art routiers, les convois réglementaires et convois exceptionnels sont introduits dans le modèle. Ces chargements mobiles sont positionnés de manière défavorable sur le tablier afin de générer les effets les plus pénalisants sur les poutres, la dalle et les appuis. Cette étape permet de représenter de manière réaliste l'impact du trafic sur la structure.



### Établissement des combinaisons de charges

Une fois l'ensemble des actions définies, les combinaisons de charges sont générées automatiquement par le logiciel pour les États Limites Ultimes (ELU) et les États Limites de Service (ELS). Ces combinaisons résultent de l'association pondérée des charges permanentes, variables et accidentelles, conformément aux règles de calcul applicables, et visent à reproduire les situations de chargement les plus défavorables pour l'ouvrage.



### III.6.4. Analyse et visualisation des sollicitations internes

L'analyse du modèle permet ensuite d'accéder aux sollicitations internes développées dans les différentes parties du pont. Les résultats sont exploités à travers les outils de visualisation du logiciel, notamment :

Les cartographies des moments fléchissant longitudinaux et transversaux ;

Les efforts normaux (N) ; les efforts tranchants (V) ; les moments fléchissant (M), obtenus pour chaque combinaison de charges.

Les résultats graphiques obtenus à partir du modèle numérique permettent de localiser les zones les plus sollicitées du tablier, notamment au droit des appuis et au niveau des travées. Ils facilitent également l'identification des valeurs maximales des efforts nécessaires au dimensionnement. Les sollicitations issues des combinaisons à l'état limite ultime (ELU) sont utilisées pour les vérifications de résistance, tandis que celles correspondant à l'état limite de service (ELS) servent à contrôler le comportement de l'ouvrage en exploitation.

## IV. ETUDE DES VOIES D'ACCES

L'aménagement des voies d'accès constitue une étape essentielle dans la conception de l'ouvrage projeté, car il garantit la continuité fonctionnelle entre la route existante et le pont. De part et d'autre de l'ouvrage, des rampes d'accès doivent être tracées en conformité avec les normes géométriques et les prescriptions définies par les termes de référence (TDR). L'étude du tracé en plan et du profil en long a ainsi été réalisée sur la base de ces

recommandations, tout en intégrant les contraintes techniques, topographiques et de sécurité. Le dimensionnement géométrique des voies d'accès est étroitement lié à la vitesse de référence, laquelle correspond à la vitesse maximale qu'un conducteur peut adopter en toute sécurité au niveau du point le plus contraignant d'un tronçon routier. Cette vitesse constitue un paramètre fondamental dans la définition des caractéristiques géométriques, notamment en termes de confort et de sécurité de circulation. Dans le cadre du présent projet, une vitesse de référence de 60 km/h a été adoptée, en adéquation avec le type d'infrastructure projetée et les conditions d'exploitation prévues.

#### IV1. Tracé en plan

Le tracé en plan correspond à la projection horizontale de l'axe de la chaussée. Il se compose de segments rectilignes reliés entre eux par des courbes circulaires ou transitionnelles (clothoïdes), permettant d'assurer une progression harmonieuse et sécurisée du tracé. Le choix et la combinaison de ces éléments géométriques doivent concilier plusieurs impératifs : adaptation à la topographie, optimisation économique, respect des conditions de sécurité et confort de conduite. Compte tenu de la vitesse de référence adoptée, les rayons minimaux des courbes ont été déterminés conformément aux normes applicables, garantissant le respect des critères de stabilité, de confort et de sécurité. Déterminés conformément aux normes applicables, garantissant le respect des critères de stabilité, de confort et de sécurité. Dans le cadre de cette étude, le choix a été fait de ne pas implanter l'ouvrage dans une courbe, afin de conserver un tracé rectiligne du pont. L'axe de la voie a ainsi été positionné perpendiculairement au lit du Massili, ce qui permet d'assurer des conditions favorables en termes de stabilité globale, de comportement structurel et de durabilité de l'ouvrage.

Tableau 5: Paramètres géométriques du tracé en plan

| Désignation du paramètre |                     |                            | Symbole et unité  | Catégorie de route |                |                |                |           |
|--------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
|                          |                     |                            |                   | 4 <sup>e</sup>     | 3 <sup>e</sup> | 2 <sup>e</sup> | 1 <sup>e</sup> | Except.   |
| Vitesse de référence     |                     |                            | <i>Vr (km/h)</i>  | 40                 | 60             | 80             | 100            | 120       |
| Tracé en plan            | Devers maximal      |                            | <i>δM(%)</i>      | 7                  | 7              | 7              | 7              | 7         |
|                          | Rayon en plan RH(m) | Minimal absolu (dévers δM) | <i>RHm</i>        | 40                 | 120            | 240            | 425            | 665       |
|                          |                     | Minimal normal (dévers)    | <i>RHN (δ%)</i>   | 120 (5%)           | 240 (5%)       | 425 (5%)       | 665 (4%)       | 1000 (4%) |
|                          |                     | Au dévers minimal          | <i>RH' (2,5%)</i> | 250                | 450            | 650            | 900            | 1500      |
|                          |                     | Non déversé                | <i>RHnd</i>       | 400                | 600            | 900            | 1300           | 1800      |

Source : Aménagement des Routes Principales(ARP)

Tableau 6: Synthèse des caractéristiques géométriques pour la catégorie R80

| Norme | Type de route | catégorie    | Vitesse de référence (km/h) |
|-------|---------------|--------------|-----------------------------|
| ARP   | RN            | VRU-type U60 | 60                          |

## IV2. Profil en long

Le profil en long traduit l'évolution altimétrique de l'axe routier le long de son tracé. Il se compose de tronçons rectilignes définis par des pentes constantes, reliés entre eux par des courbes de raccordement, généralement de forme parabolique. Ces raccordements sont dimensionnés de manière à respecter des valeurs admissibles de pente et de rayon, afin d'assurer une transition progressive entre les alignements et de garantir à la fois le confort de conduite, la sécurité et la qualité de perception visuelle pour les usagers.

Le profil en long des voies d'accès a été conçu de manière à respecter la cote minimale d'intrados du tablier, issue des études hydrologiques, afin d'assurer la libre circulation des eaux en période de crue. Compte tenu de ces contraintes, la ligne rouge a été relevée au droit de l'ouvrage, ce qui a conduit à un profil entièrement en remblai dans cette zone.

Tableau 7 : Paramètres géométriques du profil en long

| Désignation du paramètre |                                |                | Symbole et unité | Catégorie de route |                |                |                |         |
|--------------------------|--------------------------------|----------------|------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|---------|
|                          |                                |                |                  | 4 <sup>e</sup>     | 3 <sup>e</sup> | 2 <sup>e</sup> | 1 <sup>e</sup> | Except. |
| Vitesse de référence     |                                |                | $V_r$ (km/h)     | 40                 | 60             | 80             | 100            | 120     |
| Profil en long           | Déclivité maximal en rampe     |                | $\pi M(\%)$      | 8                  | 7              | 6              | 5              | 4       |
|                          | Rayon en angle saillant RV(m)  | Minimal absolu | $RV_m$           | 500                | 1500           | 3000           | 6000           | 12000   |
|                          |                                | Minimal normal | $RHN$            | 1500               | 3000           | 6000           | 12000          | 12000   |
|                          | Rayon en angle rentrant RV'(m) | Minimal absolu | $RV_m'$          | 700                | 1500           | 2200           | 3000           | 4200    |
|                          |                                | Minimal normal | $RVN'$           | 1500               | 2200           | 3000           | 4200           | 6000    |

Source : Aménagement des Routes Principales(ARP)

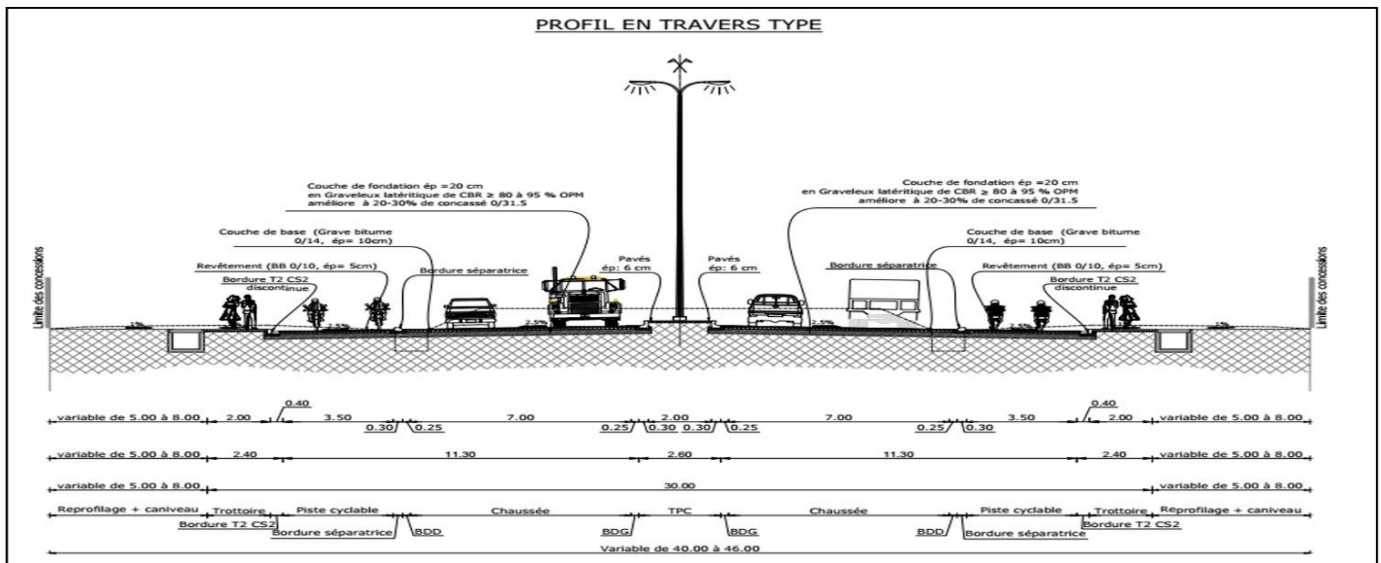
Tableau 8: Paramètres de tracé en plan et en profil – Catégorie R80

| R80               | Angle rentrant | Angle saillant | Déclivité moyenne $\pi$ |
|-------------------|----------------|----------------|-------------------------|
| Rayon normal (m)  | 1500           | 1500           | 6%                      |
| Rayon minimal (m) | 2200           | 3000           |                         |

### IV3. Profil en travers type

Le profil en travers illustre la configuration transversale de la chaussée et de ses dépendances. Il met en évidence l'assiette de la route, les talus, les accotements ainsi que les pentes transversales nécessaires à l'écoulement des eaux pluviales. Ce profil constitue également un outil essentiel pour le calcul des volumes de terrassement (déblais et remblais) et pour la définition du plan général d'aménagement.

Le profil en travers type adopté pour ce projet reflète la structure de la chaussée et ses dimensions caractéristiques. Il est présenté à la figure, qui précise la composition et les principales caractéristiques géométriques de la route d'accès.



**Source :** AGEIM-Ingénieurs Conseils, décembre 2023.

Figure 11: Profil en travers type

#### IV.4. Dimensionnement de la chaussée

##### IV.4.1 Etude du trafic

###### ■ Données du trafic

La Route Nationale n°4 (RN4) constitue un axe structurant du réseau routier burkinabè, reliant Ouagadougou à Fada N’Gourma puis au Niger. Cette voie supporte un trafic intense et varié, composé de véhicules légers, de taxis, d’autocars et d’un pourcentage significatif de poids lourds assurant le transport de marchandises entre les grands centres économiques et les zones frontalières.

Les comptages réalisés en 2021 indiquent :

- 3 832 500 véhicules légers/an
- 789 130 poids lourds/an.

Soit 20% de poids lourds ces données serviront de base pour l’estimation du trafic de dimensionnement.

###### ■ Estimation du trafic de dimensionnement

Pour l’estimation du trafic de dimensionnement, les données du trafic de référence datent de 2021, avec une mise en service prévisionnelle en 2027 et une durée de vie du projet de quinze

(15) ans). Le taux d'accroissement annuel du trafic est fixé à six pour cent (6 %), valeur couramment admise pour les axes à forte dynamique économique comme la RN4.

Estimation du trafic de dimensionnement (poids lourds)

- TMJA initial des poids lourds (2021) :  $t_0 = 789\,130 / 365 \approx 2\,162 \text{ PL/j}$
- Mise en service : 2027 → TMJA première année  $t_1 = 2\,162 \text{ PL/j}$
- Durée de vie de conception :  $L = 15 \text{ ans (2027 → 2042)}$
- Taux de croissance annuel :  $i = 6\% = 0,06$

La croissance des poids lourds est modélisée par la relation :

$$t_n = t_1 \times (1+i)^{n-1}$$

où :

- $t_n$  : TMJA des poids lourds à l'année  $n$
- $t_1$  : TMJA à la première année de mise en service
- $i$  : taux d'accroissement annuel du trafic
- $n$  : nombre d'années depuis la mise en service

TMJA initial des PL (2021) :  $t_1 = 789\,130 / 365 \approx 2\,162 \text{ PL/j}$

Nombre cumulé de poids lourds sur la durée de vie du projet est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Cumul PL} = 365 \times t_1 \times ((1+i)^{15} - 1) / i$$

Substituons les valeurs :

$$\text{Cumul PL} = 365 \times 2\,162 \times ((1+0,06)^{15} - 1) / 0,06 = 788\,630 \times 23,266 \approx 18\,334\,000 \text{ PL}$$

Répartition par voie (bidirectionnelle) :

$$\text{Cumul PL par voie} \approx 9\,167\,000 \text{ PL/voie} \quad 9,167 \times 10^6 \text{ PL/voie}$$

Tableau officiel CEBTP :

Tableau 9: Tableau des classes de trafic (NPL) officiel SETRA :

| Classe    | Intervalle de trafic cumulé par voie $N_{PL}$     |
|-----------|---------------------------------------------------|
| T1        | $< 3 \times 10^5$                                 |
| T2        | $3 \times 10^5 - 1 \times 10^6$                   |
| T3        | $1 \times 10^6 - 3 \times 10^6$                   |
| <b>T4</b> | <b><math>3 \times 10^6 - 1 \times 10^7</math></b> |
| T5        | $> 1 \times 10^7$                                 |

Le trafic cumulé pendant la durée de vie du projet permet de déterminer la classe de trafic T4, selon le Guide CEBTP. Le projet RN4 est classé T4, indiquant un trafic très élevé de

poids lourds. Cette classification orientera le dimensionnement des chaussées et des ouvrages d'art associés.

Ainsi, la classe T4 sera retenue pour le dimensionnement de la chaussée.

Les études géotechniques préalables à la conception de l'ouvrage ont été confiées au Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP). Elles avaient pour objectif de caractériser les propriétés mécaniques et géotechniques des sols en place, afin de définir les conditions de fondation les plus appropriées pour le projet.

#### IV.4.2 Classe de portance du sol

La campagne d'investigation a été menée suivant une méthodologie rigoureuse comprenant :

- La réalisation des sondages répartis le long de l'emprise du projet,
- L'établissement des coupes géotechniques correspondantes pour chaque point de sondage, permettant de visualiser la stratigraphie du terrain,
- Le prélèvement d'échantillons représentatifs destinés aux essais de laboratoire.

Les échantillons remaniés ont fait l'objet d'essais de caractérisation et de portance conformément aux normes en vigueur. Les résultats obtenus indiquent une valeur de CBR à 95 % d'optimum de 6 sur la section 2. En considérant la moyenne de ces résultats, la portance de référence retenue pour le dimensionnement des structures de chaussée est de  $CBR_{95\%} = 14$ , correspondant à un sol de type S3 selon la classification géotechnique couramment admise pour les projets routiers.

#### IV.4.3 Dimensionnement de la structure de chaussée.

Le dimensionnement de la structure de la chaussée a été conduit conformément aux recommandations du Guide pratique de dimensionnement des chaussées des pays tropicaux. Sur la base du couple géotechnique et trafic S3T4, plusieurs configurations de structures ont été envisagées. Après analyse, trois variantes représentatives ont été retenues en vue d'une comparaison technique et économique.

Ces variantes, répondant aux exigences de portance et de durabilité, sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 10: Tableaux des variantes de dimensionnement de la chaussée

| Structure type | Couche de roulement   | Couche de base     | Couche de fondation                     |
|----------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------------------|
| Variante 1     | 5 cm Béton bitumineux | 20 cm Grave-bitume | 20 cm Grave concassée ou latéritique    |
| Variante 2     | 5 cm Béton bitumineux | 15 cm Grave-bitume | 25 cm Grave latéritique sélectionnée    |
| Variante 3     | 5 cm Béton bitumineux | 15 cm Grave-bitume | 20 cm Grave améliorée au ciment (3–5 %) |

#### Analyse de la variante optimale au regard du contexte burkinabè

Le projet étant implanté au Burkina Faso, le choix de la structure ne peut reposer uniquement sur des considérations mécaniques issues du catalogue du Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux.

Il doit également intégrer les réalités locales en matière d'approvisionnement, de logistique et de maîtrise technique.

#### Disponibilité des matériaux selon les variantes

##### Variante 1

- Les graves latéritiques sont abondantes au Burkina Faso et largement utilisées en couche de fondation.
- Les graves concassées sont disponibles à partir des carrières régionales exploitées pour les projets routiers nationaux.
- Les granulats destinés à la production de la grave-bitume proviennent également de ces carrières.
- Le bitume est importé mais dispose d'un circuit d'approvisionnement maîtrisé au niveau national.

Cette variante présente une bonne compatibilité avec les ressources locales.

##### Variante 2

- Elle valorise davantage les matériaux latéritiques locaux.
- L'augmentation de l'épaisseur de fondation (25 cm) implique toutefois un volume d'extraction plus important.
- La performance mécanique dépend fortement de la qualité réelle de la latérite disponible.

Variante économiquement intéressante si la latérite présente des caractéristiques géotechniques satisfaisantes.

### Variante 3

- Nécessite l'approvisionnement en ciment.
- Implique un contrôle technique plus rigoureux (dosage, malaxage, cure).
- Augmente les coûts liés aux matériaux et à l'encadrement technique.
- Réduit toutefois les risques de déformation sous trafic lourd.

Variante mécaniquement performante mais plus exigeante économiquement et techniquement.

### Analyse comparative synthétique des variantes

Tableau 11: Analyse comparative synthétique des variantes

| Critères                | Variante 1    | Variante 2       | Variante 3  |
|-------------------------|---------------|------------------|-------------|
| Disponibilité matériaux | Très bonne    | Excellente       | Bonne       |
| Complexité technique    | Modérée       | Faible           | Élevée      |
| Coût estimatif          | Intermédiaire | Plus économique  | Plus élevé  |
| Performance mécanique   | Élevée        | Moyenne à élevée | Très élevée |

Au regard :

- De la disponibilité des matériaux locaux,
- De la maîtrise technique des entreprises nationales,
- Du contexte économique,

La Variante 1 : apparaît comme un compromis optimal entre performance structurelle et faisabilité locale.

La Variante 2 : peut être retenue si les caractéristiques de la grave latéritique sont suffisamment satisfaisantes.

La Variante 3 : bien que techniquement robuste, engendre des coûts supplémentaires liés à l'emploi du ciment et à l'exigence de contrôle accru.

Au terme de l'analyse comparative des variantes issues du catalogue CEBTP pour le couple S3T4, la Variante 1 a été retenue. La structure adoptée, composée d'un béton bitumineux en couche de roulement, d'une grave-bitume en base et d'une grave concassée en fondation, correspond à une **chaussée souple** à assise bitumineuse. Cette solution assure un niveau de performance compatible avec le trafic projeté tout en restant adaptée aux conditions techniques et économiques locales.

## IV5. Signalisation routière

### IV.5.1 Éclairage public

L'éclairage public constitue un élément essentiel de sécurité et de confort pour les usagers circulant de nuit. Son objectif n'est pas de reproduire les conditions diurnes, mais d'assurer une visibilité suffisante des zones critiques de la route, notamment les abords du pont, les bordures de trottoirs et les obstacles éventuels.

Pour les automobilistes, il garantit une perception claire des limites de la chaussée et des éléments singuliers de l'infrastructure, tandis que pour les piétons, il permet d'éviter les zones d'ombre et de distinguer nettement les obstacles et les véhicules en mouvement. Afin d'obtenir une luminance moyenne homogène, certaines conditions géométriques d'implantation doivent être respectées :

Lorsque les luminaires sont disposés sur le terre-plein central, la hauteur d'installation ( $h$ ) doit être au moins égale à la largeur de la chaussée ( $l$ ), soit :  $h \geq l$

Dans le cas contraire, une partie du flux lumineux serait mal exploitée. Afin d'assurer une répartition longitudinale homogène de l'éclairage, le rapport entre l'espacement des candélabres ( $e$ ) et leur hauteur ( $h$ ) doit respecter la condition suivante :  $e/h \leq 3,5$

Dans le cadre du présent projet, la largeur de la chaussée a été fixée à 14 m. Les paramètres relatifs à la hauteur des candélabres et à leur espacement ont été déterminés conformément à ce critère, de manière à garantir une diffusion efficace de la lumière et à assurer des conditions de visibilité satisfaisantes pour la circulation nocturne, contribuant ainsi à la sécurité des usagers.

#### IV.5.2 Signalisation routière

La signalisation routière a pour finalité d'assurer la sécurité, la lisibilité et la fluidité de la circulation sur l'ensemble du projet. Elle regroupe l'ensemble des dispositifs visuels destinés à informer, guider et réglementer le comportement des usagers, en conformité avec le Code de la route et les normes de conception géométrique en vigueur.

##### Signalisation verticale

La signalisation verticale regroupe les panneaux implantés le long de la chaussée, servant à transmettre des informations de danger, d'obligation ou d'indication. Dans le cadre du présent projet, les principaux types de panneaux retenus sont :

- Panneaux de danger (type A) : signalant les ouvrages hydrauliques, les virages dangereux et autres situations à risque ;
- Panneaux d'intersection et de priorité (type AB) : tels que arrêt obligatoire, Cédez le passage ou Priorité aux piétons ;
- Panneaux de prescription (type B) : indiquant les obligations spécifiques de circulation ;
- Panneaux d'indication (type C) : destinés à fournir des renseignements divers aux usagers.

##### Implantation de la signalisation verticale

La mise en place de la signalisation verticale obéit à des prescriptions réglementaires précises, visant à garantir une information claire et anticipée des usagers de la route.

Ainsi, les panneaux de danger sont implantés en rase campagne à une distance réglementaire d'environ 150 m en amont de la zone concernée, avec une possibilité de répétition sur les axes à vitesse élevée afin de renforcer leur visibilité.

Les panneaux de prescription, quant à eux, sont généralement disposés à proximité immédiate de la zone où la règle s'applique. Toutefois, certains panneaux d'obligation

suivent un principe d'implantation similaire à celui des panneaux de danger, afin d'assurer une meilleure anticipation par les conducteurs.

### Signalisation horizontale

La signalisation horizontale regroupe l'ensemble des marquages réalisés directement sur la chaussée. Elle joue un rôle essentiel dans l'organisation du trafic en matérialisant les voies de circulation, en identifiant les zones spécifiques réservées à certains usagers (piétons, véhicules lents, etc.) et en facilitant le guidage des automobilistes.

Conformément aux prescriptions techniques en vigueur, les marquages routiers sont exécutés en couleur blanche. L'épaisseur des lignes est définie à partir d'une unité de base  $u$ , dont la valeur dépend du type de route considérée :

7,5 cm pour les routes à chaussées séparées ;

6 cm pour les routes principales ;

5 cm pour les routes secondaires.

Dans le cadre du présent projet, la surface totale de peinture nécessaire à la réalisation de la signalisation horizontale est estimée à environ 13,5 m<sup>2</sup>, incluant les lignes de rive, les axes centraux ainsi que les différents symboles directionnels.

## V. ASPECT ENVIRONNEMENTALE

Le volet environnemental et social constitue une composante déterminante de tout projet d'aménagement ou de construction, conformément aux exigences réglementaires nationales et aux bonnes pratiques en matière de développement durable.

Dans le cadre du présent projet, l'évaluation des impacts environnementaux et sociaux (EIES) vise à identifier, analyser et apprécier les effets potentiels du projet sur les milieux naturel et humain, aussi bien durant la phase de préparation et de travaux que lors de la phase d'exploitation, afin de proposer des mesures appropriées de prévention, d'atténuation, de compensation et de suivi.

Les consultations menées auprès des parties prenantes (populations riveraines, autorités locales, services techniques) ont permis de mettre en évidence des impacts à la fois positifs et négatifs. Les impacts négatifs sont pour l'essentiel temporaires et localisés, tandis que les impacts positifs présentent un caractère durable et structurant pour le développement local.

## V.1 Cadre juridique national en matière d'environnement et de développement durable

La réalisation du projet d'élargissement de la RN4 est encadrée par plusieurs instruments juridiques nationaux régissant la protection de l'environnement, la gestion des ressources naturelles et les évaluations d'impact environnemental et social (EIES) au Burkina Faso. Selon l'EIES du projet, cela inclut notamment :

- La loi n° 005-2012/AN du 02 février 2012 relative au Code de l'environnement au Burkina Faso, qui institue l'obligation d'évaluation des impacts environnementaux et sociaux pour toute activité susceptible d'avoir des effets significatifs sur l'environnement ;
- Le Décret d'application du Code de l'environnement, qui précise les procédures d'élaboration, de consultation, d'approbation, de publication et de suivi des EIES ;
- Les textes sectoriels relatifs aux infrastructures routières et à la gestion des déchets dangereux et solides (stockage, élimination et recyclage) ;
- Les instruments nationaux de gestion du foncier et des ressources naturelles pour la protection des sols, des cours d'eau, des zones vertes et des espaces sensibles.

Ces textes imposent une évaluation rigoureuse des impacts à toutes les étapes du projet, ainsi qu'un suivi environnemental et social pendant les phases de travaux et d'exploitation.

## V.2 Cadre institutionnel impliqué

Dans la mise en œuvre du projet, plusieurs institutions publiques ont un rôle déterminant :

- Le Ministère de l'Environnement, de l'Économie Verte et du Changement Climatique (MEEVCC) : chargé du contrôle, de la validation et du suivi des EIES ;
- Le Ministère des Infrastructures et du Désenclavement : responsable de la planification, de l'exécution des travaux routiers et du suivi du respect des normes environnementales ;
- Les collectivités territoriales et autorités locales : impliquées dans la consultation des populations locales et le suivi des mesures socio-environnementales ;
- Les organismes techniques spécialisés (services techniques, bureaux de contrôle) mandatés pour vérifier la conformité des mesures à appliquer.

### V.3 Instruments internationaux et engagements sous-régionaux

Le Burkina Faso a également adhéré à plusieurs instruments internationaux qui influencent la gestion environnementale des projets infrastructurels :

- Les conventions internationales sur la protection de la biodiversité, de l'eau et du climat ;
- Les standards environnementaux et sociaux de partenaires financiers (par exemple, les exigences de la Banque Ouest-Africaine de Développement (BOAD) ou de la Banque Islamique de Développement (BID) pour les projets qu'elles financent).

La conformité de l'EIES et du Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES) à ces cadres est un prérequis légal pour l'obtention des financements et pour la mise en œuvre du projet.

### V.4 Impacts environnementaux potentiels

Les impacts identifiés dans l'EIES couvrent les phases de travaux et d'exploitation. Ils comprennent :

#### Impacts négatifs – phase de travaux

- Pollution des sols et des eaux par les rejets accidentels et la gestion inadéquate des déchets (effluents, hydrocarbures, etc.) ;
- Dégradation de la couverture végétale et perturbations des habitats naturels ;
- Nuisances sonores et vibrations affectant le confort des populations riveraines ;
- Risques de santé publique, notamment par la propagation des IST/VIH-SIDA liée à l'arrivée de main-d'œuvre ;
- Accroissement des risques d'accidents de chantier et de circulation locale.

#### Impacts négatifs – phase d'exploitation

- Pollutions atmosphériques liées au trafic intense des véhicules ;
- Pollution par ruissellement des eaux de pluie chargées en hydrocarbures et métaux lourds vers les milieux aquatiques ;
- Pressions durables sur le tissu social et les services urbains (mobilité accrue, risques de conflits autour du foncier).

## Impacts positifs

Malgré les effets négatifs potentiels, le projet comporte aussi des retombées socio-économiques importantes :

- Création d'emplois pendant les travaux et lors de l'exploitation ;
- Dynamisation de l'économie locale (commerce, services, mobilité) ;
- Amélioration durable de la mobilité urbaine, réduisant le temps de déplacement ;
- Sécurisation des populations et des usagers par une meilleure infrastructure adaptée aux flux de circulation ;
- Attraction d'investissements et de développement des zones périphériques.

Mesures d'atténuation proposées

À partir des impacts identifiés, nous avons défini des mesures d'atténuation intégrées au Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES). Elles visent à limiter les effets négatifs du projet, principalement pendant la phase des travaux. Les mesures retenues concernent la protection de l'eau, des sols et de la végétation, la santé et la sécurité, ainsi que la prévention des conflits.

Le tableau ci-dessous présente les mesures, les responsables et les périodes de mise en œuvre. Nous assurerons le suivi de leur application afin d'en garantir l'efficacité.

Tableau 12 : Mesures d'atténuation proposées

| Impacts                               | Mesures                                                                                                           | Mise en œuvre                                          | Responsables                                           |                                                        | Période             |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|
|                                       |                                                                                                                   |                                                        | Contrôle                                               | Vérification de l'application                          |                     |
| Pollution de l'eau                    | Mise en place d'aire de stockage des produits liquide, des bacs de récupération des huiles et graisses de vidange | Entreprise                                             | Maitre d'œuvre                                         | Mission de contrôle                                    | Pendant les travaux |
|                                       | Nettoyage général et complet du site                                                                              |                                                        |                                                        |                                                        | Fin des travaux     |
| Érosion et appauvrissement du sol     | Recouvrir les zones végétales et aplanir les sites d'emprunt                                                      | Entreprise                                             | Maitre d'œuvre                                         | Mission de contrôle                                    | Fin des travaux     |
| Dégradation de la couverture végétale | Choix optimal de la base du chantier et respect du code forestier                                                 | Entreprise                                             | Maitre d'œuvre                                         | Mission de contrôle                                    | Début des travaux   |
|                                       | Opération de reboisement                                                                                          |                                                        |                                                        |                                                        | Fin des travaux     |
| Risque sur la santé                   | Arrosage, sensibilisation et distribution des préservatifs                                                        | ONG et entreprise                                      | Ministère de la Santé et maitre d'œuvre                | Ministère de la Santé                                  | Pendant les travaux |
| Risque d'accident et sécurité         | Mise en place des panneaux de signalisation et port des EPI                                                       | Entreprise                                             | Maitre d'œuvre                                         | Mission de contrôle                                    | Pendant les travaux |
| Risque de conflits                    | Sensibilisation, tolérance, négociation                                                                           | Entreprise, chefs coutumiers, préfet et maitre d'œuvre | Entreprise, chefs coutumiers, préfet et maitre d'œuvre | Entreprise, chefs coutumiers, préfet et maitre d'œuvre | Pendant les travaux |

VI. Le devis estimatif.

| Réf                          | Désignation                                                                | Unités | Quantités | Prix Unitaires | Prix Totaux |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|----------------|-------------|
| A. INSTALLATIONS ET SERVICES |                                                                            |        |           |                |             |
|                              | Travaux préparatoire et installation de chantier + Autres travaux généraux |        |           |                |             |
| 1                            | Etude d'exécution                                                          | ff     | 1,000     | 35 000 000     | 35 000 000  |
| 2                            | Contrôle d'exécution                                                       | ff     | 1,000     | 100 000 000    | 100 000 000 |
| 3                            | Installation et repli de chantier                                          | ff     | 1,000     | 55 000 000     | 55 000 000  |
| 4                            | Implantation                                                               | ff     | 1,000     | 5 000 000      | 5 000 000   |
| 5                            | Recalibrage du lit du fleuve                                               | ml     | 90,000    | 50 000         | 4 500 000   |
|                              | Sous-total installations et services                                       |        |           |                | 199 500 000 |
| B- OUVRAGES D'ART            |                                                                            |        |           |                |             |
|                              | FONDATION                                                                  |        |           |                |             |
| 1                            | Fouille pour fondation                                                     | m3     | 580,000   | 1500           | 8 700 000   |
| 2                            | Béton de propreté sous semelles de liaison                                 | m3     | 22,00     | 70000          | 1 540 000   |
| 3                            | Béton armé pour semelles de liaison                                        | m3     | 125,000   | 200 000        | 25 000 000  |
|                              | Sous-total ouvrages d'art                                                  |        |           |                | 35 240 000  |
|                              |                                                                            |        |           |                |             |
|                              | LES APPUIS                                                                 |        |           |                |             |
| 1                            | Béton armé pour piles                                                      | m3     | 111,230   | 200 000        | 22 246 000  |
| 2                            | Béton armé pour culées                                                     | m3     | 145,473   | 200 000        | 29 094 600  |
| 3                            | Béton armé pour murs en retour                                             | m3     | 27,100    | 200 000        | 5 420 000   |
| 4                            | Coffrage                                                                   | m2     | 124,520   | 17 000         | 2 116 840   |
|                              | Sous-total les appuis                                                      |        |           |                | 58 877 440  |

Tableau 13: Le devis estimatif.

|                              |                                                      |                |         |           |             |
|------------------------------|------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------|-------------|
|                              | LE TABLIER                                           |                |         |           |             |
| 1                            | Béton armé pour hourdis                              | m <sup>3</sup> | 161,000 | 200 000   | 32 200 000  |
| 2                            | Béton armé pour poutres                              | m <sup>3</sup> | 138,400 | 200 000   | 27 680 000  |
| 3                            | Béton armé pour entretoises                          | m <sup>3</sup> | 34,200  | 200 000   | 6 840 000   |
| 4                            | Coffrage                                             | m <sup>2</sup> | 147,000 | 17 000    | 2 499 000   |
|                              | Sous-totale tablier                                  |                |         |           | 69 219 000  |
|                              |                                                      |                |         |           |             |
|                              | SUPERSTRUCTURE                                       |                |         |           |             |
| 1                            | Trottoirs                                            | ml             | 135,000 | 110 000   | 14 850 000  |
| 2                            | Bordures de trottoir                                 | ml             | 149,000 | 8 000     | 1 192 000   |
| 3                            | Corniches                                            | ml             | 152,200 | 30 000    | 4 566 000   |
|                              | Sous-total superstructure                            |                |         |           | 20 608 000  |
|                              |                                                      |                |         |           |             |
|                              | LES EUIPEMENTS                                       |                |         |           |             |
| 1                            | Etanchéité                                           | m <sup>2</sup> | 655,000 | 20 000    | 13 100 000  |
| 2                            | Béton armé pour dalles de transition                 | m <sup>3</sup> | 42,50   | 200 000   | 8 500 000   |
| 3                            | Béton de propreté sous la dalle de transition        | m3             | 7,100   | 70 000    | 497 000     |
| 4                            | Barrière BN4                                         | ml             | 104,000 | 350 000   | 36 400 000  |
| 5                            | Joints de chaussée                                   | ml             | 35,000  | 250 000   | 8 750 000   |
| 6                            | Joints de trottoir                                   | ml             | 14,000  | 230 000   | 3 220 000   |
| 7                            | Appareils d'appuis en élastomère fretté              | u              | 26,000  | 1 100 000 | 28 600 000  |
| 8                            | Bossages                                             | u              | 26,000  | 600 000   | 15 600 000  |
| 10                           | Gargouilles PVC                                      | u              | 10,000  | 100 000   | 1000 000    |
| 11                           | Signalisation                                        | ff             | 1,000   | 1 800 000 | 1 800 000   |
|                              | Sous-total équipements                               |                |         |           | 117 467 000 |
| C. MESURES ENVIRONNEMENTALES |                                                      |                |         |           |             |
|                              | MESURES ENVIRONNEMENTALES                            |                |         |           |             |
| 1                            | Réalisation d'une plantation autour de la zone       | U              | 1250    | 5000      | 6 250 000   |
| 2                            | Réalisation d'un bosquet villageois dans la localité | U              | 3       | 3 850 000 | 11 550 000  |

|   |                                                                                               |         |   |            |            |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---|------------|------------|
| 3 | Campagne de sensibilisations sur les IST, le VIH/SIDA, les Grossesses non désirées, l'hygiène | Séance  | 2 | 2 500 000  | 5 000 000  |
| 4 | Distributions gratuites de préservatifs au personnel du chantier                              | Forfait |   | 1 000 000  | 1000 000   |
| 5 | Indemnisation des personnes affectées                                                         | Forfait |   | 25 000 000 | 25 000 000 |
|   | Sous-total mesures environnementales                                                          |         |   |            | 48 800 000 |
|   |                                                                                               |         |   |            |            |

Tableau 14 : Récapitulatif devis estimatif.

VI.1 Récapitulatif

|                               |               |
|-------------------------------|---------------|
| A -INSTALLATIONS ET SERVICES  | 199 500 000   |
| B - OUVRAGES D'ART            | 300 411 440   |
| C - MESURES ENVIRONNEMENTALES | 48 800 000    |
| TOTAL                         | 548 711 440   |
| TV (18%)                      | 647 479 499,2 |

## Conclusion

Le projet d'aménagement et d'élargissement de la Route Nationale n°4 (RN4), intégrant la conception et l'étude technique d'un pont franchissant le cours d'eau Massili, s'inscrit dans une démarche globale de modernisation des infrastructures routières nationales. Ce projet vise à améliorer la continuité du trafic, la sécurité des usagers et la qualité de service de cet axe stratégique, dans un contexte marqué par l'augmentation du trafic et les contraintes naturelles du site.

Les travaux développés dans le cadre de ce mémoire ont permis d'aborder de manière progressive et cohérente l'ensemble des composantes techniques du projet. À partir des informations disponibles, complétées par des hypothèses de calcul adaptées au contexte local, la conception géométrique et structurelle de l'ouvrage a été établie dans le respect des règlements techniques en vigueur. La modélisation et le dimensionnement du pont à poutres en béton armé, constitué de trois travées, ont été réalisés à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis. Cet outil a permis d'analyser le comportement global de la structure, d'évaluer les sollicitations internes et de vérifier la capacité résistante des différents éléments porteurs.

L'étude a également intégré l'insertion de l'ouvrage dans la RN4 élargie, à travers l'examen des voies d'accès et des dispositions fonctionnelles nécessaires pour assurer la continuité du trafic et la sécurité des usagers. En parallèle, les aspects environnementaux et sociaux ont été pris en compte de manière qualitative, en identifiant les principaux impacts susceptibles d'être générés par la réalisation du projet et en proposant des mesures générales destinées à en limiter les effets sur le plan économique, une estimation du coût global du projet a été réalisée afin d'apprécier sa faisabilité. Le coût total du projet est évalué à 647 479 499,2 FCFA, traduisant une solution techniquement cohérente et économiquement maîtrisée au regard des objectifs fixés.

En définitive, cette étude a conduit à la définition d'un projet globalement cohérent et techniquement maîtrisé, répondant aux exigences fondamentales de sécurité, de durabilité et de fonctionnalité. La construction du pont sur le Massili contribuera ainsi à l'amélioration des conditions de circulation sur la RN4 et participera au renforcement du rôle structurant de cet axe routier dans le développement socio-économique des zones qu'il dessert.

## Perspectives et recommandations

Au regard des résultats obtenus et des enjeux associés à l'exploitation de l'ouvrage, plusieurs perspectives et recommandations peuvent être formulées afin d'assurer la pérennité et l'efficacité du projet à long terme.

Il est, en premier lieu, préconisé de mettre en place un dispositif d'entretien régulier du pont ainsi que de l'ensemble de ses ouvrages connexes. Ce dispositif devra porter notamment sur le contrôle périodique de l'état du tablier, des appuis, des appareils d'appui et des systèmes de drainage. Un suivi continu permettra d'anticiper les phénomènes de dégradation, de limiter les interventions lourdes et de préserver durablement les capacités portantes et fonctionnelles de l'ouvrage.

Par ailleurs, l'amélioration de la sécurité routière constitue un enjeu majeur associé à la mise en service de l'infrastructure. À cet effet, il est recommandé d'accompagner l'exploitation du pont par des actions de sensibilisation à destination des usagers, combinées à des dispositifs de contrôle visant au respect des limitations de vitesse et des règles de circulation, afin de réduire le risque d'accidents.

D'un point de vue environnemental, l'adoption de mesures d'atténuation adaptées, telles que la protection et la stabilisation des berges ainsi que la restauration de la couverture végétale aux abords de l'ouvrage, permettra de limiter les perturbations du milieu naturel et de favoriser une meilleure intégration paysagère du projet.

Enfin, il est recommandé de procéder à une évaluation périodique des performances de l'infrastructure, aussi bien sur le plan structurel que fonctionnel. Ce retour d'expérience, fondé sur l'évolution du trafic et des conditions d'exploitation, offrira la possibilité de détecter d'éventuelles insuffisances et d'apporter, si nécessaire, des mesures correctives afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage.

## Bibliographie

- Bernard-Gely, A., & Calgaro, J.-A. (2000). Conception des ponts. *Techniques de l'Ingénieur*.
- Calgaro, J.-A. (2000). *Projet et construction des ponts : Généralités, fondations, appuis, ouvrages courants*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- CEBTP. (1980). *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux*. CEBTP.
- CEREMA. (1996). *VIPP – Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension : Guide de conception*. CEREMA.  
[https://piles.cerema.fr/IMG/pdf/vipp\\_ponts\\_a\\_poutres\\_prefabriquees\\_precontraintes\\_par\\_post-tension\\_guide\\_de\\_conception\\_1996\\_cle645d2a.pdf](https://piles.cerema.fr/IMG/pdf/vipp_ponts_a_poutres_prefabriquees_precontraintes_par_post-tension_guide_de_conception_1996_cle645d2a.pdf)
- Charon, P. (1986). *Calcul des ouvrages en béton armé suivant les règles BAEL*.
- Courbon, J. (2000). Résistance des matériaux – Théorie des poutres. *Techniques de l'Ingénieur*.  
<https://www.techniques-ingenieur.fr>
- Courbon, J., & Theillout, J.-N. (2001). Résistance des matériaux – Formulaire. *Techniques de l'Ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur.fr>
- Direction Générale des Infrastructures Routières (DGIR). (s. d.). *Études techniques relatives à la construction d'un pont et de ses voies d'accès sur le Plandi à Banzon – RR18*. DGIR.  
<https://docplayer.fr/134435347-Etudes-techniques-relatives-a-la-construction-d-un-pont-et-de-ses-voies-d-acces-sur-le-plandi-a-banzon-route-regionale-18.html>
- École Nationale d'Ingénieurs de Tunis. (s. d.). *Cours d'ouvrages d'art – Tome 1 et Tome 2*. ENIT.
- Globex Construction Burkina Faso. (s. d.). *Présentation de l'entreprise Globex Construction BF*.  
<http://www.globexconstructionbf.com/>

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). (s. d.). *Cours d'ouvrages d'art*. [http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac\\_css/doc\\_num.php?explnum\\_id=1291](http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=1291)

LCPC & SETRA. (1990). *Environnement des appareils d'appui en élastomère fretté – Recueil des règles de l'art*. LCPC/SETRA.

LCPC & SETRA. (1994). *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*. LCPC/SETRA.

Massonnet, C. (1962). Compléments à la méthode de calcul des ponts à poutres multiples. *Annales de l'ITBTP*.

Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports. (1993). *Fascicule n°62 – Titre V : Fondations des ouvrages de génie civil*. CCTG.

Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports. (1999). *Fascicule n°62 – BAEL 91 révisé 99*. CCTG. <https://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr>

Ministère de l'Équipement et du Logement & Ministère de l'Économie et des Finances. (1981). *Fascicule n°61 – Programmes de charges et épreuves des ponts-routes*. CCTG.

Perchat, J. (2001). Béton armé – Ossatures et éléments courants. *Techniques de l'Ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur.fr>

SETRA. (1974). *Piles et Palées (PP 73) – Appuis des tabliers*. SETRA.

SETRA. (1984). *Dalles de transition des ponts-routes – Technique et réalisation*. SETRA.

SETRA. (1994). *Aménagement des routes principales*. SETRA.

SETRA. (1999). *Guide du projeteur d'ouvrages d'art – Ponts courants*. SETRA.

# Annexe

## 1) Prédimensionnement de l'ouvrage

### Choix de la configuration de l'ouvrage

Afin d'assurer une répartition homogène des charges et de limiter les risques de fissuration au niveau du terre-plein central (TPC), nous avons retenu la conception de deux tabliers distincts.

Pour le prédimensionnement, cette configuration conduit aux largeurs suivantes :

8,5 m pour le premier tablier ;

9,5 m pour le second tablier.

Nous avons choisi de dimensionner le tablier de 9,5 m, représentant le cas le plus défavorable du point de vue structural.

La répartition du profil en travers routier a été définie sur ce tablier selon les exigences de circulation et les charges de projet :

|                   |             |
|-------------------|-------------|
| <b>Accotement</b> | <b>1,5m</b> |
| <b>Chaussée</b>   | <b>7m</b>   |
| <b>TPC</b>        | <b>1m</b>   |
| <b>TOTAL</b>      | <b>9,5m</b> |

### 1.1.Prédimensionnement des poutres

#### a) Portée

La portée maximale de l'ouvrage est fixée à :  $L=18m$

#### b) Hauteur des poutres

Selon les recommandations de Calgaro (2000), la hauteur économique des poutres se situe pour un rapport d'élancement compris entre 1/15 et 1/17 de la portée, soit :

$$L/17 \leq H_p \leq L/15 \Rightarrow 1,05 \text{ m} \leq H_p \leq 1,20 \text{ m}$$

On adopte :  $H_p = 1,10 \text{ m}$ .

#### c) Épaisseur des poutres

L'épaisseur minimale  $b_p$  des poutres doit respecter la relation :

$$b_p \geq \frac{H_p}{3} \Rightarrow b_p \geq 0,37m \quad b_p = 0,4m$$

#### d) Nombre de poutres

Le nombre de poutres est fonction de la largeur du tablier. Il est déterminé à partir du tableau

de correspondance proposé par Calgaro, permettant de relier la largeur du tablier au nombre optimal de poutres assurant à la fois la stabilité et la performance structurelle de l'ouvrage.

| Largeur du tablier (m) | Nombre de poutres (N) |
|------------------------|-----------------------|
| < 6 m                  | 2                     |
| 6 m à 9 m              | 3                     |
| 9 m à 11 m             | 4                     |
| 11 m à 14 m            | 5                     |

Ainsi donc pour un tablier de 9,5m alors  $N = 4$

### 1.2.Prédimensionnement du hourdis

L'épaisseur du hourdis  $e_h$  est déterminée en fonction de l'entraxe des poutres principales.

D'après le tableau de prédimensionnement empirique proposé par Calgaro (2000), les valeurs usuelles sont les suivantes :

|          |    |     |    |     |
|----------|----|-----|----|-----|
| $b_0(m)$ | 2  | 2,5 | 3  | 3,5 |
| $e_h$    | 16 | 18  | 20 | 22  |

Dans le cas présent, un entraxe de  $b_0 = 2,4m$  a été retenu.

La valeur correspondante de l'épaisseur du hourdis est donc  $e_h \approx 18$  par mesure de sécurité et de durabilité, l'épaisseur adoptée est :  $e_h = 20cm$ .

### 1.3.Prédimensionnement des entretoises

- a) La hauteur  $H_e$  des entretoises est généralement égale à la retombée des poutres diminuée de l'épaisseur du hourdis, soit :

$$H_e = H_p - e_h = 1,1 - 0,2 = 0,9$$

**$H_e = 0,9m$**

- b) Epaisseur des entretoises

La largeur minimale  $b_e$  des entretoises est données par la relation empirique :

$$b_e \geq \frac{H_e}{3} \text{ soit } b_e \geq 0,30m \text{ on adopte par conséquent : } b_e = 0,40 m$$

- c) Largeur libre des entretoises

La largeur effective  $L_e$  entre deux entretoises peut être calculée par :

$$L_e = b_0 - 2 \times \frac{b_e}{2} = 2,4 - 2 \times \frac{0,4}{2} = 2,0m \quad \text{d'où } L_e = 2,0 \text{ m}$$

#### d) Détermination du nombre d'entretoises

Les entretoises jouent un rôle essentiel dans l'encastrement à la torsion des poutres, notamment au niveau des appuis. Selon Calgaro (2000), la pratique courante consiste à limiter leur nombre aux entretoises d'about, celles-ci remplissant à la fois les fonctions de blocage à la torsion et de stabilisation lors du vérinage. L'ajout d'entretoises intermédiaires, en revanche, tend à compliquer l'exécution, à affaiblir localement les poutres et à rendre le tablier excessivement rigide et peu déformable. Ainsi, pour le présent projet, seules deux entretoises par travée seront prévues, disposées aux extrémités du tablier :  $N_e = 2$

### 1.4. Equipements et dispositifs de protection

Les équipements de pont regroupent l'ensemble des dispositifs complémentaires à la structure, assurant son bon fonctionnement, sa durabilité et la sécurité des usagers. Ils se répartissent en trois grandes catégories :

- Équipements fonctionnels : appareils d'appui et joints de chaussée, permettant le libre fonctionnement de la structure sous l'effet des charges et des variations thermiques ;
- Équipements de protection et de pérennité : systèmes d'étanchéité, corniches, perrés et dispositifs d'évacuation des eaux, destinés à préserver les éléments structurels contre les agressions climatiques et chimiques ;
- Équipements de sécurité : dispositifs de retenue tels que garde-corps, glissières, barrières de sécurité et bordures de trottoirs, assurant la protection des usagers et du personnel d'entretien

### 1.5. Étanchéité du tablier

Le système d'étanchéité du tablier a pour fonction principale de protéger le béton contre les infiltrations d'eau et les agents chimiques susceptibles de provoquer la corrosion des armatures, contribuant ainsi à la durabilité du tablier et à la pérennité de l'ouvrage.

Plusieurs solutions techniques sont envisageables pour assurer cette étanchéité :

Revêtements bitumineux armés (feuilles de bitume modifié par polymère avec armature intégrée)

- Avantages : excellente résistance aux sollicitations mécaniques, étanchéité fiable, facilement réparable.
- Limites : coût modéré à élever et nécessite une mise en œuvre soignée.

Membranes élastomères ou caoutchouc (EPDM, SBS, TPO, etc.)

- Avantages : grande flexibilité, résistance aux UV et aux variations thermiques, longue durée de vie.
- Limites : pose plus technique et protection mécanique nécessaire.

Étanchéité liquide (résines polyuréthane ou polyuréas)

- Avantages : adaptation parfaite aux formes complexes du tablier, sans joints.
- Limites : support strictement préparé nécessaire et sensibilité aux intempéries lors de la pose.

Béton étanche ou additives hydrofuges intégrés au béton

- Avantages : aucune couche supplémentaire, résistance mécanique maximale, entretien minimal.
- Limites : performance limitée contre les infiltrations prolongées, coût élevé et contrôle qualité strict requis.

Pour le présent projet, le choix retenu est le revêtement bitumineux armé par polymère, en raison de sa fiabilité éprouvée, sa durabilité et sa mise en œuvre maîtrisée localement, tout en assurant une protection efficace contre les infiltrations d'eau et un entretien simple sur le long terme.

#### 1.6. Dispositifs de retenue

Afin d'assurer la sécurité des usagers, qu'ils soient piétons ou automobilistes, les ponts sont

équipés de dispositifs de retenue adaptés aux différents types de trafic. Ces équipements se déclinent principalement en deux catégories :

- Les garde-corps, destinés à protéger les piétons contre les risques de chute ;
- Les barrières de sécurité (ou glissières) de niveau N, destinées à contenir les véhicules légers et à limiter les conséquences d'une sortie de chaussée.

Dans le cadre du présent projet, notre choix s'est porté sur une barrière de type BN4 – classe H, en raison de sa capacité à résister aux chocs de véhicules lourds et à prévenir leur basculement depuis le tablier. Ce choix garantit un niveau de sécurité optimal tout en respectant les exigences normatives en vigueur.

#### 1.7. Les corniches

Les corniches jouent un rôle à la fois esthétique et fonctionnel dans la conception de l'ouvrage. Sur le plan technique, elles peuvent servir de support pour le relevé d'étanchéité, de butée pour les trottoirs, ou encore d'élément d'ancrage pour les garde-corps.

Toutefois, dans les conceptions modernes, certaines de ces fonctions sont désormais intégrées directement aux éléments structurels du tablier, réduisant ainsi la nécessité d'une corniche indépendante. Leur conception reste néanmoins importante pour assurer la cohérence architecturale et la protection des bords du tablier.

#### 1.8. Les trottoirs

Le trottoir a pour fonction principale d'assurer la séparation physique entre la circulation piétonne et automobile, contribuant ainsi à la sécurité des usagers.

Selon le guide ARP, la largeur minimale recommandée d'un trottoir sur ouvrage d'art est de 1,00 m, avec une surélévation comprise entre 16 et 20 cm par rapport à la chaussée.

Pour le présent projet, nous avons retenu des trottoirs de 1,50 m de largeur et de 20 cm d'épaisseur, répondant ainsi aux exigences de confort, d'accessibilité et de sécurité.

#### 1.9. Les appareils d'appui

Les appareils d'appui assurent la liaison entre le tablier et ses appuis (culées ou piles). Ils jouent un rôle fondamental dans la transmission des efforts verticaux et horizontaux, tout en permettant

les déplacements relatifs dus aux variations thermiques et aux charges d'exploitation.

Plusieurs solutions sont envisageables :

Appareils d'appui en élastomère fretté

- Avantages : absorption des déplacements verticaux et horizontaux, simplicité de mise en œuvre, fiabilité, faible entretien.
- Limites : adaptés aux ponts courants, mais moins adaptés aux ponts très longs ou soumis à de très grands déplacements.

Appareils d'appui métalliques (PTFE, glisseurs ou glissières)

- Avantages : permettent de très grands déplacements horizontaux, haute résistance aux charges.
- Limites : coût plus élevé et entretien nécessaire.

Appareils d'appui à coussin hydraulique ou à ressort

- Avantages : adaptés aux grandes déformations ou ponts spéciaux, amortissement des vibrations.
- Limites : coût élevé et utilisation rare pour des ponts routiers classiques.

Appareils d'appui composites ou polymères avancés

- Avantages : combinaison de glissement et élasticité, durabilité élevée, faible entretien.
- Limites : moins répandus et plus coûteux.

Notre choix pour le présent ouvrage : des appareils d'appui en élastomère fretté. Ce type est largement utilisé pour les ponts routiers standards et offre un excellent compromis entre fiabilité, simplicité de mise en œuvre et capacité d'absorption des déformations dues aux variations thermiques et aux charges d'exploitation. Il correspond parfaitement aux contraintes techniques et aux pratiques locales de réalisation.

#### 1.10. La dalle de transition

La dalle de transition a pour objectif de compenser les tassements différentiels entre le remblai d'accès et le tablier du pont. En effet, il est souvent difficile d'obtenir une compaction homogène du remblai situé immédiatement à l'arrière des culées. Cette insuffisance de compactage entraîne la formation d'un ressaut ou « escalier » entre la chaussée et le tablier, susceptible d'augmenter les effets dynamiques et de détériorer la surface de roulement (SETRA, 1984).

Pour pallier ce phénomène, une dalle de transition est disposée entre le tablier et le remblai compacté. Dans le cadre du présent projet, nous avons les dimensions suivantes :

$$L = 3\text{m}, l = 10\text{m}, e = 0,30\text{m}$$

En complément, l'ouvrage est équipé de dispositifs annexes tels que :

- Les systèmes d'évacuation des eaux pluviales,
- Les réservations pour canalisations de service public,
- Les dispositifs de visite et d'entretien,
- Ainsi que les bossages de maintenance assurant la stabilité des appareils d'appui.

#### 1.11. Prédimensionnement des appuis

##### a) Conception des culées

Conformément aux prescriptions du PP73 et aux recommandations de Calgaro, les caractéristiques géométriques suivantes ont été retenues :

##### Mur de front

- Epaisseur :  $0,8\text{ m} \leq E \leq 1,2\text{ m} \Rightarrow E = 1,00\text{ m}$
- Hauteur : déterminée en fonction de la cote de l'intrados, issue des études hydrologiques et hydrauliques, ainsi que de la profondeur du bon sol.  
La hauteur retenue est :  $h = 4,00\text{ m}$

##### Mur garde-grève

- Hauteur : équivalente à celle du tablier et des dispositifs d'appui, soit :  $h_{gg} = 1,40\text{ m}$
- Épaisseur : donnée par la relation empirique (SETRA, 1974) :  $e_{gg} = 0,1h_{gg} + 0,1 = 0,25\text{ m}$

##### Murets caches

Les murets caches assurent à la fois des fonctions esthétiques, de protection du sommier contre les venues de terres, et de raidissement du mur garde-grève. Ils sont disposés latéralement sur le sommier avec une épaisseur de 0,20 m chacun.

##### Corbeau

- Épaisseur maximale adoptée :  $e_{\text{max}} = 0,45\text{ m}$

##### Bossage

- Hauteur :  $h = 0,10\text{ m}$  avec un débord latéral de 5 cm de part et d'autre des appareils d'appui.

### Dalle de transition associée à la culée

- La longueur  $L$  de la dalle est définie selon la relation suivante :

$$L = \inf[6 \text{ m} ; \sup(3 \text{ m} ; 0,6H)] = 3 \text{ m}$$

- L'épaisseur adoptée est de 30 cm.

#### b) Conception des piles

Les piles assurent la reprise des efforts verticaux et horizontaux transmis par le tablier vers les fondations.

Pour l'ouvrage étudié, il a été retenu des piles de type poteau circulaire, caractérisées par leur efficacité structurale et leur facilité d'exécution.

Les principales dimensions sont les suivantes :

- Colonnes : 3 poteaux circulaires de 0,70 m de diamètre et 5,25 m de hauteur ;
- Bossage : hauteur  $h = 0,10\text{m}$  avec un débord de 5 cm autour de l'appareil d'appui ;
- Chevêtre :
  - Longueur =  $9,5 + 0,5 = 10,0\text{m}$
  - Largeur =  $1,20\text{m}$
  - Hauteur =  $0,80\text{m}$

## 2) Étude de la structure

### 1. Notes d'hypothèses générales

#### a) Les Références réglementaires et normes techniques

Le dimensionnement et la vérification des éléments structuraux de l'ouvrage sont effectués conformément aux règlements et instructions en vigueur, notamment

- Règles BAEL 91 révisées 99 : relatives au calcul des structures en béton armé selon la méthode des états limites ultimes et de service.
- Fascicule n°61, Titre II : définissant les programmes de charges et les épreuves applicables aux ponts-routes pour les surcharges routières.
- Fascicule n°62, Titre V : portant sur les règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil.

#### b) Caractéristiques des matériaux

Les propriétés mécaniques adoptées pour les matériaux de construction sont les suivantes :

- Béton de classe B35 :

$$f_{c28} = 35 \text{ MPa} ; \gamma_b = 1,15 ; f_{tj} = 2,4 \text{ MPa} ; \text{ poids volumique : } 25 \text{ KN/m}^3$$

- Acier :  $f_e = 500 \text{ MPa}$ ,  $\gamma_s = 1,15$

Ces caractéristiques sont uniformément appliquées à l'ensemble des éléments constitutifs du pont.

## 2. Inventaire des charges

### a) Charges permanentes

Les charges permanentes comprennent :

- Le poids propre de la structure, calculé sur la base d'un poids volumique du béton de  $\rho_b = 2500 \text{ daN/ml}$
- Le poids des garde-corps, estimé à  $50 \text{ daN/ml}$  ;
- L'ensemble étanchéité + couche de roulement, d'une épaisseur moyenne de  $10 \text{ cm}$ , et d'un poids volumique de  $2400 \text{ daN/m}^3$  ;

### b) Charges d'exploitation (surcharges routières)

#### V.1 Types de surcharges

Selon le Fascicule 61 – Titre II, les surcharges routières se répartissent en plusieurs catégories :

- Charges routières normales, définies selon deux systèmes distincts : Système A ; Système B.
- Charges à caractère particulier : de type militaire ou exceptionnel.
- Charges sur remblais, spécifiques aux ouvrages enterrés.

Ces systèmes de chargement sont indépendants ; leurs effets ne doivent pas être combinés.

Le système A ne génère généralement pas les sollicitations les plus défavorables pour les hourdis et sera donc réservé au calcul des poutres principales.

Le système B est utilisé pour le dimensionnement courant de l'ensemble des éléments du tablier.

Les charges particulières ne sont prises en compte que pour les itinéraires classés à cet effet.

#### V.2 Classe de l'ouvrage et détermination des largeurs caractéristiques

Avant l'application des charges, il convient de définir la géométrie effective de la chaussée.

- Largeur roulable (LR) : portion du tablier comprise entre dispositifs de retenue ou bordures.  $L_R = \text{largeur du tablier} - \text{largeur du trottoir}$

Pour notre cas :  $L_R = 9,5 - 1,5 = 8 \text{ m}$ .

- Largeur chargeable (L<sub>ch</sub>) :

$$L_{ch} = L_R - n \times 0,5 \text{ avec } n = 2 \text{ dispositifs de retenue, soit : } L_{ch} = 8 - 2 \times 0,5 = 7\text{m.}$$

- Classe du pont :

D'après le Fascicule 61, les classes sont définies ainsi :

$$1^{\text{re}} \text{ classe : } L_R \geq 7\text{m ;}$$

$$2^{\text{e}} \text{ classe : } 5,5 \text{ m} < L_R < 7 \text{ m}$$

$$3^{\text{e}} \text{ classe : } L_R \leq 5,5 \text{ m}$$

Avec  $L_R = 8 \text{ m}$ , l'ouvrage étudié relève de la 1<sup>re</sup> classe.

- Nombre de voies de circulation (N<sub>v</sub>)

$$N_v = E\left(\frac{L_{ch}}{3}\right) = E\left(\frac{7}{3}\right) = 2$$

La chaussée comporte donc deux voies de circulation.

- Largeur d'une voie :

$$V = \frac{L_{ch}}{N_v} = \frac{7}{2} = 3,5 \text{ m}$$

### 3. Systèmes de chargement

#### a) Systèmes de charges A

Le système A est constitué de charges uniformément réparties, dont l'intensité varie selon la longueur surchargée.

Il représente la présence d'une ou plusieurs files de véhicules à l'arrêt sur le pont.

La charge surfacique équivalente est donnée par la relation :

$$A(L) = 230 + \frac{36000}{L+12} \left( \frac{\frac{daN}{m^2} \cdot kg}{m^2} \right) \text{ avec } L = \text{largeur chargée}$$

Des coefficients correctifs  $a_1$  et  $a_2$  sont ensuite appliqués (Fascicule 61- Titre II) :

$$A_1(L) = \max \left[ a_1 \left( 230 + \frac{36000}{L+12} \right) ; 400 - 0,2L \right]$$

Pour une portée  $L = 18 \text{ m}$ , on obtient :  $A(L) = 1430 \text{ daN/m}^2$

Ainsi :

- Cas d'une seule voie chargée :  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 1430 \text{ daN/m}^2$ .
- Cas de deux voies chargées :  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 1430 \text{ daN/m}^2$ .

$V_0 = 3,5 \text{ m}$  pour les ponts de 1<sup>re</sup> classe,  $3 \text{ m}$  pour la 2<sup>e</sup> classe et  $2,75 \text{ m}$  pour la 3<sup>e</sup> classe.

#### b) Système de charge B

Les charges de type B se composent de trois systèmes indépendants :

- Système Bc : camions types ;
- Système Bt : groupes de deux essieux (essieux-tandems) ;
- Système Br : roue isolée.

c) Le convoi Bc

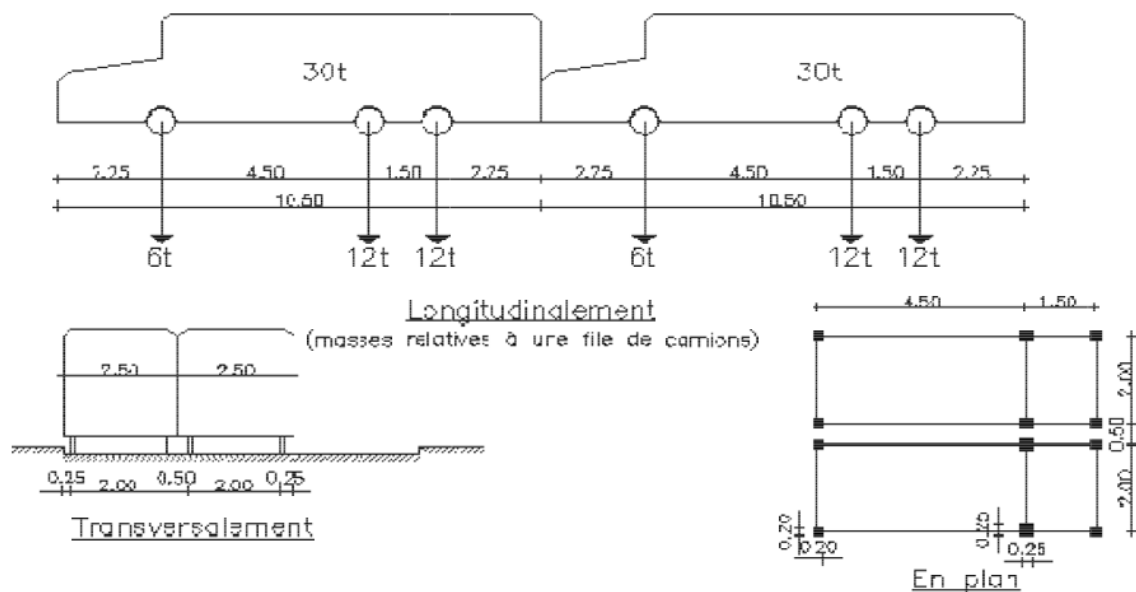
Selon le Fascicule 61 – Titre II, le système Bc comprend un ou deux camions types par file.

Le nombre de files chargées transversalement ne peut excéder le nombre de voies de circulation.

L'axe de la roue la plus excentrée doit respecter une distance minimale de 0,75 m du bord si un dispositif de sécurité est présent et de 0,25 m si le bord est matérialisé par une simple bordure.

Les valeurs des charges d'essieux sont précisées dans le fascicule.

Les caractéristiques sont représentées dans le schéma ci-dessous :



En fonction de la classe du pont et du nombre de files considérées, les valeurs des charges du système Bc prises en compte sont multipliées par des coefficients  $b_c$  donnés par le fascicule 61 Titre II.

Les coefficients multiplicateurs  $b_c$  dépendent du nombre de voies chargées :

- Pour une voie :  $b_c = 1,2$  ;
- Pour deux voies :  $b_c = 1,1$ .

d) Le système Bt

Le système Bt est formé d'un tandem composé de deux essieux à roues simples.

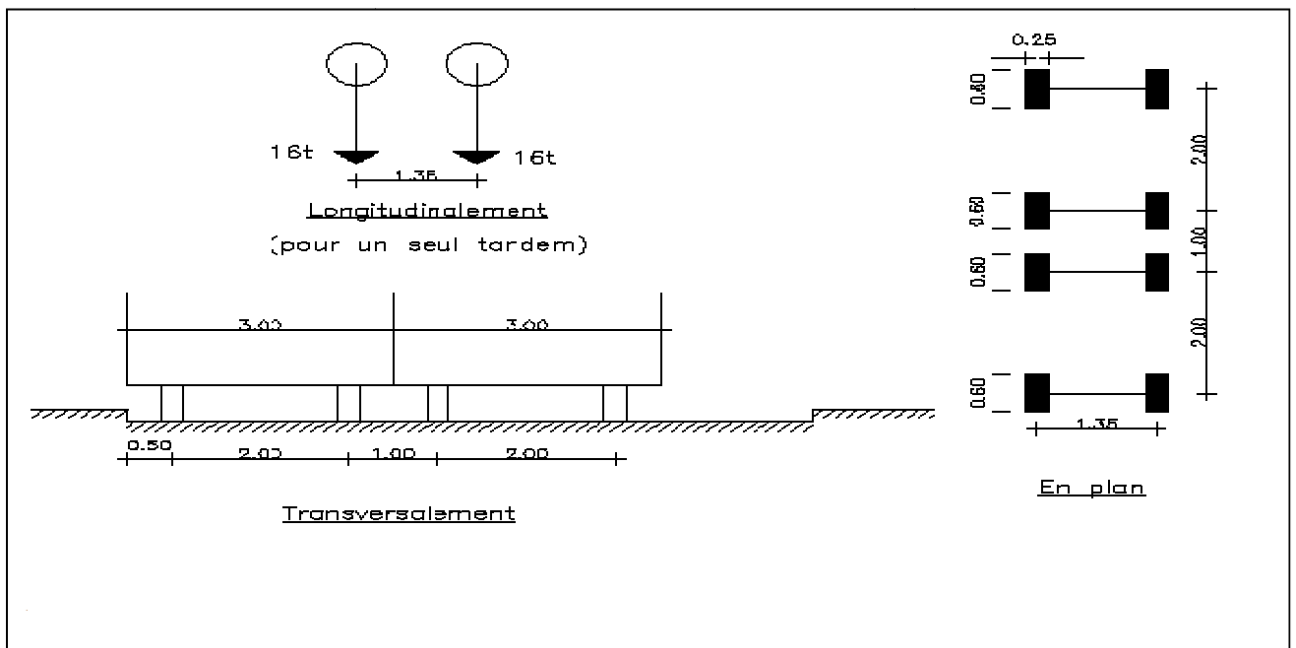
Les règles d'application sont les suivantes :

- Dans le sens longitudinal, un seul tandem est disposé par file.
- Dans le sens transversal, on peut disposer au plus deux tandems côte à côte sur une chaussée comportant deux voies ou plus.
- L'axe de la roue la plus excentrée est situé à au moins :  
1,00 m du bord s'il existe un dispositif de retenue ; 0,50 m s'il s'agit d'une bordure simple.

Les coefficients  $b_t$  dépendent de la classe du pont.

Pour les ponts de 1<sup>re</sup> classe  $bt=1$ , quelle que soit la configuration des voies.

Les caractéristiques sont représentées dans le schéma ci-dessous :

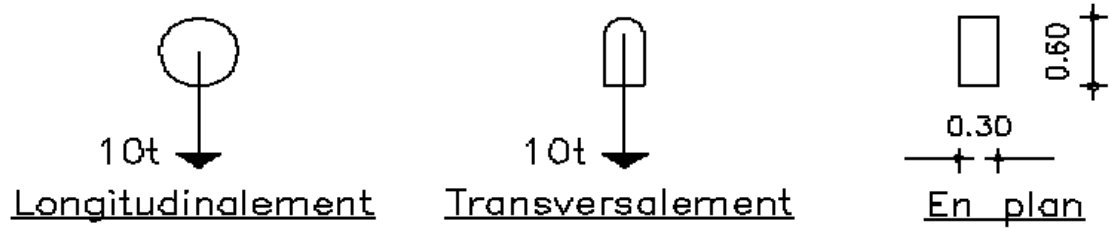


e) Le système Br

Le système Br correspond à une roue isolée, placée de manière à produire l'effet le plus défavorable.

L'axe de cette roue doit respecter une distance minimale de 0,75 m du bord en présence d'un dispositif de sécurité et de 0,25 m du bord s'il s'agit d'une simple bordure.

Les caractéristiques sont représentées dans le schéma ci-dessous :



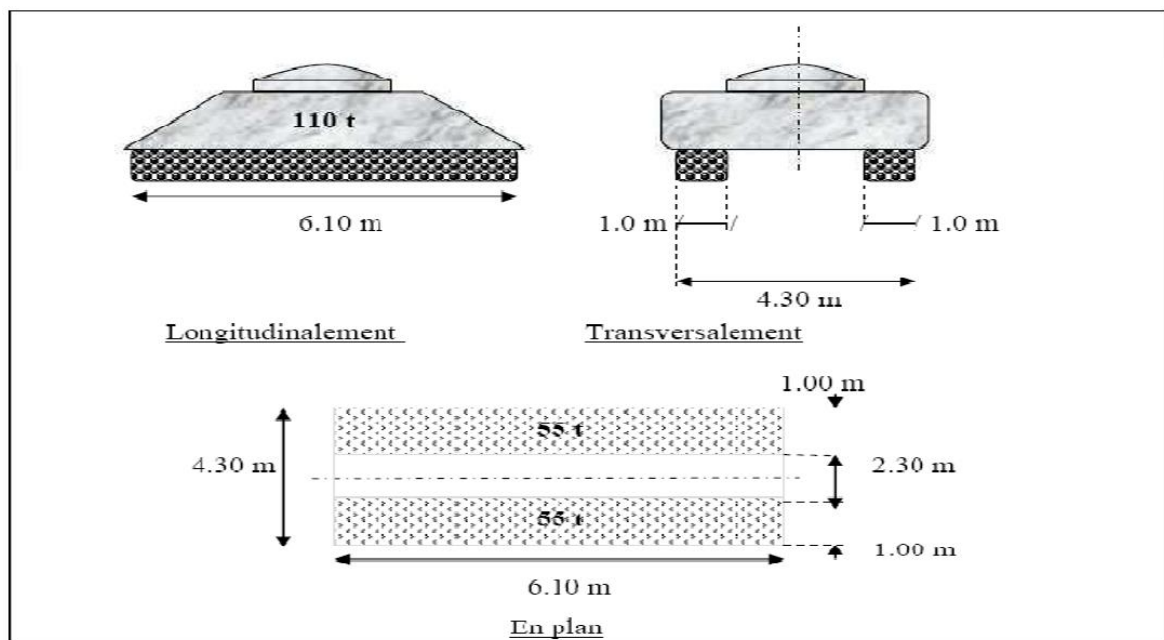
f) Le système à chenilles MC120

Le système MC120 représente un véhicule à chenilles, utilisé pour simuler le passage d'engins lourds.

Il est constitué de deux chenilles de 55 t chacune, réparties longitudinalement sur 6,10 m et espacées transversalement de 2,30 m.

Ce système est principalement appliqué pour l'évaluation des sollicitations particulières sur les ponts de première catégorie.

Les caractéristiques sont représentées dans le schéma ci-dessous :



g) Charges sur les trottoirs

Les trottoirs sont soumis à deux types de surcharges.

Pour le dimensionnement des entretoises et des hourdis, une surcharge locale de 450 kg/m<sup>2</sup> est retenue.

En revanche, le calcul des poutres principales s'effectue à partir d'une surcharge générale de 150 kg/m<sup>2</sup>. Ces valeurs permettent de représenter les sollicitations induites par la circulation piétonne et les charges d'entretien susceptibles d'agir sur ces zones.

#### h) Charges sur les remblais

Les efforts considérés dans les remblais incluent principalement la poussée latérale exercée par les terres sur les éléments structurels tels que les culées supportant les abouts de pont. La charge équivalente retenue pour le calcul est estimée à 1 t/m<sup>2</sup>, valeur couramment admise pour représenter la pression exercée par le remblai sur les structures de soutènement.

### 4. Détermination des coefficients de majoration dynamique

#### a) Coefficient de majoration dynamique du système B

Les charges du système B, constituées de surcharges roulantes, doivent être multipliées par un coefficient dynamique noté  $\delta_h$ , le coefficient de majoration dynamique  $\delta_{bh}$  traduit l'effet dynamique des charges mobiles (chocs, vibrations, irrégularités de la chaussée) sur les éléments porteurs du tablier. Il est défini par la relation :

$$\Delta = 1 + \frac{0,4}{1+0,2L} + \frac{0,6}{1+4\frac{G}{S}} \text{ avec :}$$

L : Longueur de l'élément considéré (m)

G : charge permanente de l'élément considéré (daN)

S : surcharge maximale susceptible d'être placée sur l'élément considéré (daN).

#### V.3 Coefficient de majoration dynamique pour le hourdis

Les paramètres adoptés sont :

$L = \min [\max (L_r, L_{rive}) ; L_c] = \min [\max (8, 7,68) ; 8] = 8\text{m}$  avec  $L_{rive}$  largeur entre-axe des poutres de rive ;  $L_r$  la largeur roulable et  $L_c$  la portée maximale des poutres.

Les charges permanentes sont calculées comme suit :  $G : g \text{ (ml)} \times 1$

- Couche de roulement + étanchéité (épaisseur 0,10 m, masse volumique 2,4 t/m<sup>3</sup>) :

$$G_1 = 2400 \times 0,10 = 240 \text{ daN/m}^2$$

- Hourdis (épaisseur 0,20 m, masse volumique 2,5 t/m³) :  $G_2 = 2500 \times 0,20 = 500 \text{ daN/m}^2$
- Dalle totale :  $(G_1 + G_2) \times 9,5 = 7030 \text{ daN/ml}$
- Trottoir et corniche :  $0,20 \times 1,5 \times 2500 = 750 \text{ daN/ml}$
- Garde-corps (type BN4) :  $50 \text{ daN/ml}$

$$\text{D'où } G = (7030 + 750 + 50) \times 8 = 62640 \text{ daN}.$$

Détermination de  $S$  et calcul numérique de  $\delta_{bh}$  (système B hourdis)

Pour le système B, la surcharge maximale  $S$  susceptible d'être placée sur l'élément considéré est prise comme la valeur la plus pénalisante parmi les trois contributions possibles :

$S = \sup \{S_{bc}, S_{bt}, S_{Br}\}$  où  $S_{bc}$ ,  $S_{bt}$  et  $S_{Br}$  représentent respectivement les effets maximaux dus aux convois Bc (camions types), au tandem Bt et à la roue isolée Br.

Dans le cas étudié le convoi Bc est dominant ; en tenant compte du coefficient multiplicateur  $b_c$  applicable (ici  $b_c=1,1$  pour deux voies chargées), on obtient :

$$S = b_c \times 600 \text{ kN} = 1,1 \times 600 \text{ kN} = 660 \text{ kN}.$$

Le coefficient de majoration dynamique est donné par :  $\delta_{bh} = 1 + \frac{0,4}{1+0,2L} + \frac{0,6}{1+4\frac{G}{S}}$

Avec  $L$  la longueur caractéristique,  $G$  la charge permanente totale de l'élément considéré et  $S$  la surcharge mobile maximale.

$$\delta_{bh} = 1 + \frac{0,4}{1+0,2 \times 8} + \frac{0,6}{1+4\frac{62640}{660000}} \approx 1,59.$$

Pour le hourdis, en prenant  $S = 660 \text{ kN}$  convoi Bc le coefficient obtenu est :  $\delta_{bh}=1,59$

#### V.4 Coefficient de majoration dynamique pour les poutres et entretoises

Longueur de la travée :  $L=18 \text{ m}$

Charges permanentes ( $G$ ) : les différentes contributions au poids total du tablier sont évaluées comme suit :

- Couche de roulement + étanchéité (épaisseur 0,10 m, masse volumique 2,4 t/m³) :  
 $G_1 = 2400 \times 0,10 = 240 \text{ daN/m}^2$
- Hourdis :  $G_2 = 2500 \times 0,20 \times 2,56 = 1280 \text{ daN/m}^2$   
Total dalle:  $G_1 + G_2 = 1500 \times 7 = 10500 \text{ daN /ml}$
- Trottoir (+ corniche) :  $G_3 = 0,20 \times 1,5 \times 2500 = 750 \text{ daN/ml}$
- Poutres principales :  $G_4 = 1,1 \times 0,40 \times 2500 \times 4 = 4400 \text{ daN/ml}$
- Garde-corps :  $G_5 = 50 \text{ daN/ml}$
- Entretoises :  $G_6 = 3888 \text{ daN}$

Poids total du tablier sur la travée :  $G = (10500 + 750 + 4400 + 50) \times 18 + 3888 = 286448 \text{ daN}$

Calcul de la surcharge mobile S

Le cas le plus défavorable correspond au convoi Bc sur deux voies chargées :

$$S = bc \times 2 \times 600 = 1,1 \times 2 \times 600 = 1320 \text{ kN} = 1320000 \text{ daN}$$

Le coefficient de majoration dynamique est donné par :  $\delta_{bh} = 1 + \frac{0,4}{1+0,2L} + \frac{0,6}{1+4\frac{G}{S}}$

$$\delta_{bh} = 1 + \frac{0,4}{1+0,2 \times 18} + \frac{0,6}{1+4\frac{286448}{1320000}} \quad \delta = 1 + 0,0869 + 0,321 = 1,47$$

$$\delta_{bh} = 1,47$$

V.5 Coefficient de majoration dynamique du système Mc120

Les charges militaires du système Mc120 sont également corrigées par un coefficient dynamique  $\delta M$ , obtenu à partir de la même formule.

- Pour le hourdis

$$L = 8 \text{ m}; G = 62640 \text{ daN}; S = 110000 \text{ daN}.$$

Un seul véhicule Mc120 peut être placé sur l'ouvrage.

$$\delta_{Mh} = 1,34$$

- Pour les poutres et entretoises

$$L = 18 \text{ m}; G = 286448 \text{ daN}; S = 110000 \text{ daN}.$$

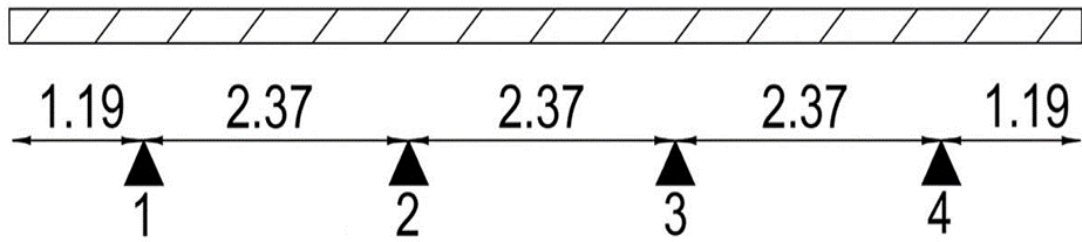
$$\delta_{Mh} = 1,20$$

## 5. Justification des éléments du tablier

### 01. Justification du hourdis

#### 2.5.1.1. Modélisation

Le calcul du hourdis est effectué selon la méthode forfaitaire, sur une bande unitaire de 1 m de largeur.



#### 2.5.1.2. Évaluation des charges permanentes

Le hourdis est considéré comme reposé sur les poutres principales et les entretoises d'about.

Les hypothèses de base sont :

Couche d'étanchéité en asphalte de 3 cm, Couche de roulement de 7 cm.

$\omega$  représente la masse volumique du béton armé (25 kN/m<sup>3</sup>) et celui du revêtement et e l'épaisseur de l'élément considéré.  $g_h = \omega \times e$

Revêtement :  $g_1 = 24 \times 0,10 = 2,4 \text{ kN/m}^2$ ,

Dalle :  $g_2 = 25 \times 0,20 = 5,0 \text{ kN/m}^2$ ,

Prédalle :  $g_3 = 25 \times 0,05 = 1,25 \text{ kN/m}^2$ ,

Total  $g_h = 8,65 \text{ kN/m}^2$

Les coefficients appliqués sont :

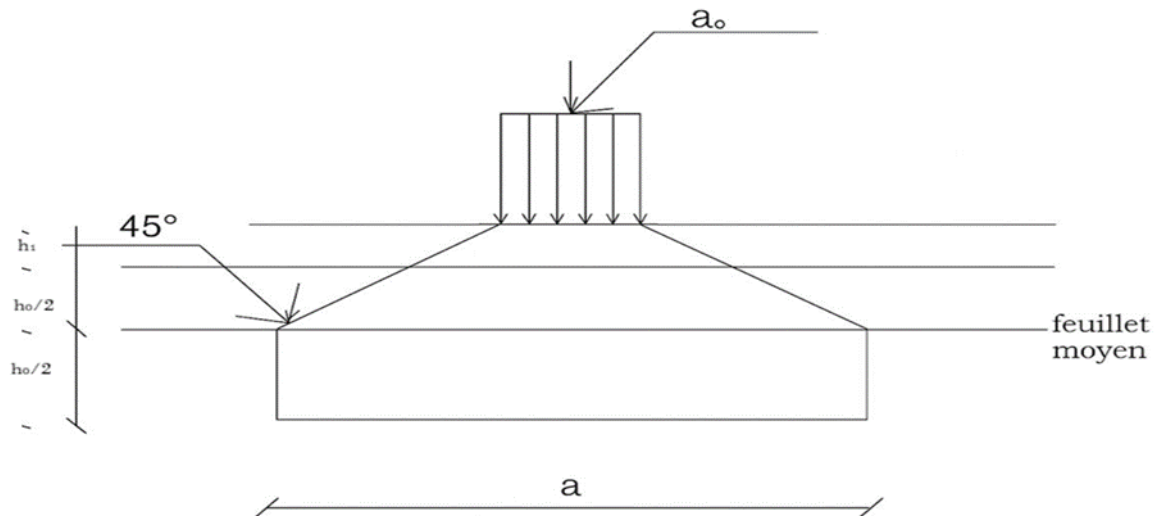
$a_1 = a_2 = 1$  (pont de 1re classe à deux voies chargées),

$b_c = 1,10$  ;  $b_t = 1$ ,

$\delta_{Bh} = 1,59$  ;  $\delta_{Mh} = 1,34$ .

#### 2.5.1.3. Vérification du poinçonnement du hourdis

La vérification du non-poinçonnement s'effectue sous les roues **Br** et **Bt**, en supposant une roue centrée sur une plaque de dalle.



Les dimensions de la zone d'influence sont :

$$a = h_0 + a_0 + 2\varepsilon h_1 ; b = h_0 + b_0 + 2\varepsilon h_1, \text{ avec } \varepsilon = 0,75.$$

Les paramètres :  $h_1 = 0,10 \text{ m}$ ,  $h_0 = 0,20 \text{ m}$ .

La condition de résistance est :  $h_0 \geq h_0' = \frac{Q_u}{0,045 \times U_c \times f_{c28}}$  où  $U_c = 2(a+b)$  est le périmètre du feuillet moyen, et  $Q_u$  la charge de poinçonnement à l'ELU multipliée par les coefficients  $\delta$ ,  $b_t$  et  $b_c$ .  $\xi$  est un coefficient dépendant de la nature du revêtement.

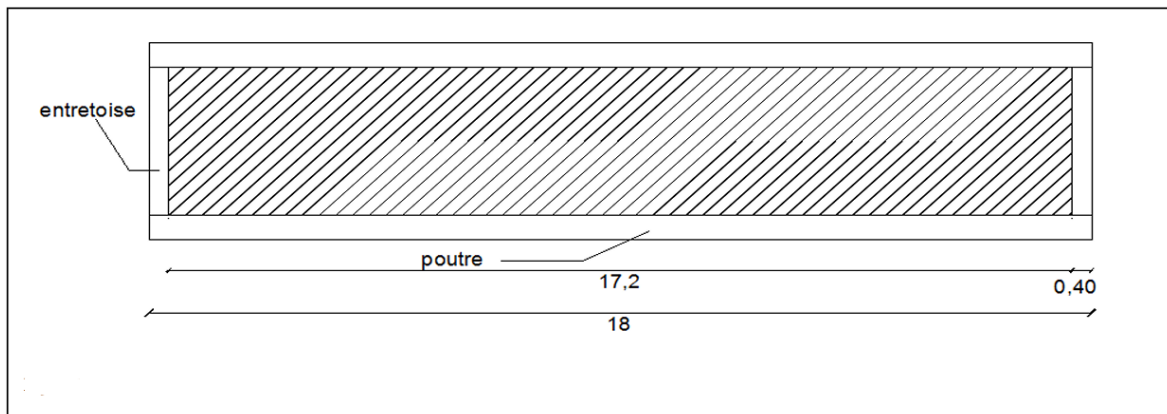
Les résultats numériques sont regroupés dans le tableau récapitulatif correspondant.

| Roue                       | Bt    | Br   | Bc     | Unités |
|----------------------------|-------|------|--------|--------|
| <b>Poids</b>               | 80    | 100  | 60     | KN     |
| <b>bt ou bc</b>            | 1     |      | 1,1    |        |
| <b><math>\delta</math></b> | 1,59  | 1,59 | 1,59   |        |
| <b>Qu</b>                  | 127,2 | 159  | 104,94 | KN     |
| <b>h0</b>                  | 0,2   | 0,2  | 0,2    | m      |
| <b>h1</b>                  | 0,1   | 0,1  | 0,1    | m      |
| <b>a0</b>                  | 0,6   | 0,6  | 0,25   | m      |
| <b>b0</b>                  | 0,25  | 0,3  | 0,2    | m      |
| <b>a</b>                   | 0,95  | 0,95 | 0,6    | m      |

|                   |         |         |         |   |
|-------------------|---------|---------|---------|---|
| <b>b</b>          | 0,6     | 0,65    | 0,55    | m |
| <b>Uc</b>         | 3,1     | 3,2     | 2,3     | m |
| <b>h'0</b>        | 0,030   | 0,037   | 0,034   | m |
| <b>Conclusion</b> | vérifié | vérifié | vérifié |   |

#### 2.5.1.4. Calcul des sollicitations dans un panneau de hourdis isostatique

On considère un panneau de hourdis reposant sur les poutres et les entretoises.



Ses dimensions sont :  $l_x = \lambda - b$  (distance entre les axes neutres des poutres) et  $l_y = l - 2be$  avec :  $l = 18\text{m}$  : portée de la poutre,  $e = 0,40\text{m}$  : épaisseur des entretoises d'about.

On obtient ainsi :  $l_x = 2,16\text{m}$ ,  $l_y = 17,2\text{m}$ ,  $\alpha = l_x/l_y = 0,12$

La valeur du rapport  $\alpha$  indique que le panneau travaille principalement dans un seul sens, à savoir le sens  $l_x$

#### V.6 Sollicitations dues aux charges permanentes

Le total des charges permanentes est estimé à :  $g_h = 8,65\text{kN/m}^2$

- Moments fléchissant :  $M_{xg} = \frac{g_h l_x^2}{8} = 5,04 \text{ kN / ml}$  ;  $M_{yg} = 0 \text{ kN / ml}$
- Efforts tranchants :  $V_{xg} = \frac{g_h l_x}{2} = 9,34 \text{ kN / ml}$ ,  $V_{yg} = 0 \text{ kN / ml}$

#### V.7 Sollicitations dues au système A

La surcharge du système A est donnée par la relation :  $A(l) = 230 + \frac{36000}{l+12}$

avec  $l=18$  la portée on obtient  $A(18)=1430 \text{ daN / m}^2$

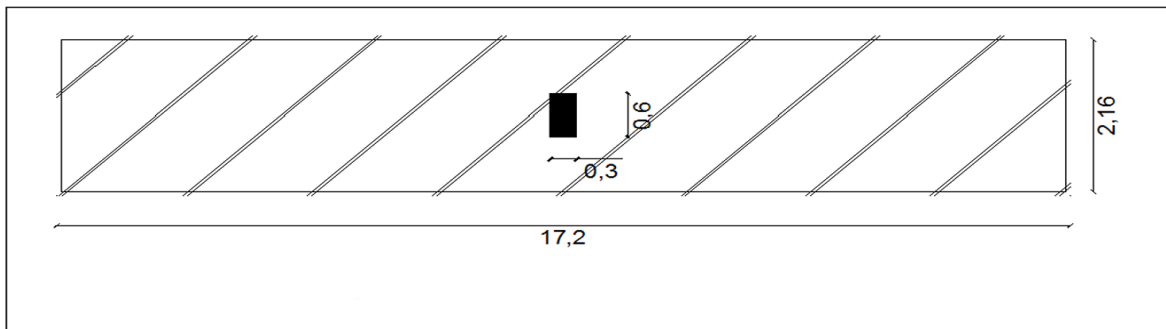
Après application des coefficients  $a_1 = 1$  et  $a_2 = 1$  on obtient :  
 $qA = A(18) = 1430 \text{ daN} / \text{m}^2 = 14,30 \text{ kN} / \text{m}^2$ .  
 Dans notre cas  $a_1 = a_2 = 1$ , donc la charge utile surfacique adoptée reste  $qA = 14,30 \text{ kN/m}^2$

Les sollicitations maximales pour une poutre/panneau simplement appuyé de portée  $l_x$

- Moment fléchissant maximal :  $M_{x, \max} = \frac{ql_x^2}{8} = \frac{14,30 \times (2,16)^2}{8} \approx 8,34 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
- Effort tranchant maximal (au support) :  $V_{\max} = \frac{ql_x}{2} = \frac{14,30 \times 2,16}{2} \approx 15,44 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

#### V.8 Sollicitations dues au système Br

La roue isolée du système Br est supposée centrée sur le panneau de dalle et les sollicitations sont déterminées à l'aide des abaques de MOUGIN le rectangle d'impact est disposé perpendiculairement à l'axe de la chaussée.



Les dimensions du rectangle chargé au niveau du feuillet moyen sont calculées comme suit :

$$a = h_0 + a_0 + 2\xi h_1, \quad b = h_0 + b_0 + 2\xi h_1 \text{ avec}$$

$$a_0 = 60 \text{ cm}, \quad b_0 = 30 \text{ cm}, \quad h_0 = 20 \text{ cm}, \quad h_1 = 10 \text{ cm}, \quad \xi = 0,75 \text{ on obtient } a = 95 \text{ cm}, \quad b = 65 \text{ cm}$$

- Moment fléchissant

$$\text{À l'aide des abaques de MOUGIN : } U = \frac{a}{l_x} = 0,43, \quad V = \frac{b}{l_y} = 0,038$$

Pour  $\alpha = \frac{l_x}{l_y} = 0,12$ , les coefficients extraits des abaques sont  $M_1 = 0,16$  et  $M_2 = 0,12$ .

$$\text{Les moments sont calculés selon : } M_x = (M_1 + \eta M_2) P \text{ et } M_y = (\eta M_1 + M_2) P$$

Avec  $\eta$  = (coefficient de Poisson pour le béton armé selon l'article A.2.1.3 du BAEL 91) et  $P = 100 \times 1,59 \text{ kN}$ .

$$\text{Ainsi } M_x = 0,16 \times 100 \times 1,59 = 25,44 \text{ kN.m/ml et } M_y = 0,12 \times 100 \times 1,59 = 19,08 \text{ kN.m/ml}$$

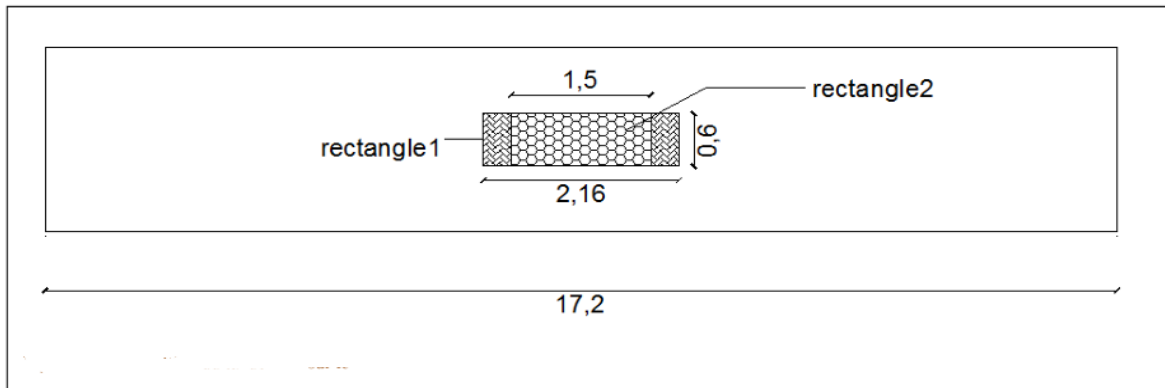
▪ Effort tranchant

Suivant l'axe x :  $V_{x, \max} = \frac{P}{2a+b}$  ;  $V_{x, \max} = \frac{100 \times 1,59}{2 \times 0,95 + 0,65} = 62,35 \text{ kN/ml}$

Suivant l'axe y :  $V_{y, \max} = \frac{P}{3a}$  ;  $V_{y, \max} = \frac{100 \times 1,59}{3 \times 0,95} = 55,78 \text{ kN/m}$

V.9 Sollicitations dues au système Bt

Pour le système Bt, deux roues du tandem (80 kN chacune) sont centrées sur le panneau.



Le calcul s'effectue également à l'aide des abaques de MOUGIN. Les sollicitations résultent de la superposition des effets : la différence entre celles du grand rectangle (rectangle 1) et du petit rectangle (rectangle 2).

Les résultats détaillés sont présentés dans le tableau récapitulatif correspondant.

| <b>Rectangles</b>    | <b>Rectangle1</b> | <b>Rectangle2</b> | <b>Unités</b> |
|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| <b>lx</b>            | 2,16              | 2,16              | m             |
| <b>ly</b>            | 17,2              | 17,2              | m             |
| <b>poids</b>         | 691,2             | 480               | KN            |
| <b>bt</b>            | 1                 | 1                 |               |
| <b>δ</b>             | 1,59              | 1,59              |               |
| <b>Qu</b>            | 1099,008          | 763,2             | KN            |
| <b>h<sub>0</sub></b> | 0,2               | 0,2               | m             |
| <b>h<sub>1</sub></b> | 0,1               | 0,1               | m             |
| <b>a<sub>0</sub></b> | 0,6               | 0,6               | m             |
| <b>b<sub>0</sub></b> | 2,16              | 1,5               | m             |

|                            |        |        |         |
|----------------------------|--------|--------|---------|
| <b>a</b>                   | 0,95   | 0,95   | m       |
| <b>b</b>                   | 2,51   | 1,85   | m       |
| <b>u</b>                   | 0,44   | 0,44   |         |
| <b>v</b>                   | 0,15   | 0,11   |         |
| <b>M<sub>1</sub></b>       | 0,12   | 0,13   |         |
| <b>M<sub>2</sub></b>       | 0,025  | 0,03   |         |
| <b>M<sub>x</sub></b>       | 131,88 | 99,22  | KN.m/ml |
| <b>M<sub>y</sub></b>       | 27,48  | 22,90  | KN.m/ml |
| <b>V<sub>x</sub></b>       | 184,09 | 164,13 | KN/ml   |
| <b>V<sub>y</sub></b>       | 145,95 | 137,51 | KN/ml   |
| <b>M<sub>x</sub> [1-2]</b> | 32,66  |        | KN.m/ml |
| <b>M<sub>y</sub>[1-2]</b>  | 4,58   |        | KN.m/ml |
| <b>V<sub>x</sub>[1-2]</b>  | 19,96  |        | KN.m/ml |
| <b>V<sub>y</sub>[1-2]</b>  | 8,44   |        | KN.m/ml |

#### V.10 Sollicitations dues aux surcharges militaires

Dans le cas du convoi militaire de type Mc120, une chenille est centrée sur le panneau. Les sollicitations correspondantes sont déterminées à partir des abaques de MOUGIN et figurent dans le tableau de synthèse.

| <b>CONVOI Mc120</b>  |      | <b>UNITE</b> |
|----------------------|------|--------------|
| <b>lx</b>            | 2,16 | m            |
| <b>ly</b>            | 17,2 | m            |
| <b>poids</b>         | 550  | KN           |
| <b>δ</b>             | 1,34 |              |
| <b>Qu</b>            | 737  | KN           |
| <b>h<sub>0</sub></b> | 0,2  | m            |
| <b>h<sub>1</sub></b> | 0,1  | m            |
| <b>a<sub>0</sub></b> | 1    | m            |
| <b>b<sub>0</sub></b> | 6,1  | m            |
| <b>a</b>             | 1,35 | m            |

|                             |        |         |
|-----------------------------|--------|---------|
| <b><i>b</i></b>             | 6,45   | m       |
| <b><i>u</i></b>             | 0,625  |         |
| <b><i>v</i></b>             | 0,375  |         |
| <b><i>M<sub>1</sub></i></b> | 0,069  |         |
| <b><i>M<sub>2</sub></i></b> | 0,004  |         |
| <b><i>M<sub>x</sub></i></b> | 50,853 | KN.m/ml |
| <b><i>M<sub>y</sub></i></b> | 2,948  | KN.m/ml |
| <b><i>V<sub>x</sub></i></b> | 51,72  | KN/ml   |
| <b><i>V<sub>y</sub></i></b> | 38,09  | KN/ml   |

#### Récapitulatif des sollicitations du hourdis

Cette section présente une synthèse des principales sollicitations auxquelles le hourdis est soumis. Les valeurs indiquées proviennent du modèle de calcul adopté pour le tablier et servent de base au dimensionnement des armatures de la dalle

#### V.11 Sollicitations non pondérées de la dalle

Le tableau ci-dessous présente les valeurs caractéristiques des sollicitations appliquées sur la dalle avant la prise en compte des coefficients de pondération.

| Charges permanente | Charges exploitation |       |       |        |         |
|--------------------|----------------------|-------|-------|--------|---------|
|                    | A                    | Bt    | Br    | Mc120  | Maximum |
| 5,04               | 8,34                 | 32,66 | 25,44 | 50,853 | 50,85   |
| 0                  | 0                    | 4,58  | 19,08 | 2,948  | 19,08   |
| 9,34               | 15,44                | 19,96 | 62,35 | 51,72  | 62,35   |
| 0                  | 0                    | 8,44  | 55,78 | 38,09  | 55,78   |

#### V.12 Effort tranchant dans la dalle à l'état limite de service (ELS)

| Système                | A                  | Bt                  | Br                  | Mc120              | Maximum |
|------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------|
| Combinaison            | <b>1,35G+1,60A</b> | <b>1,35G+1,60Bt</b> | <b>1,35G+1,60Br</b> | <b>1,35G+1,60M</b> |         |
| V <sub>x</sub> (Kn/ml) | 37,3902            | 44,54               | 112,37              | 95,36              | 112,37  |
| V <sub>y</sub> (Kn/ml) | 0                  | 13,50               | 89,25               | 60,94              | 89,25   |

## V.13 Moment fléchissant dans la dalle à l'état limite de service (ELS)

| Système          | A       | Bt        | Br       | Mc120   | Maximum |
|------------------|---------|-----------|----------|---------|---------|
| Combinaison      | G+1,20A | G+1,20Bt  | G+1,20Br | G+1,20M |         |
| Mox<br>(KN.m/ml) | 15,048  | 44,237952 | 35,568   | 66,0636 | 66,06   |
| Moy<br>(KN.m/ml) | 0       | 5,49504   | 22,896   | 3,5376  | 22,90   |

## V.14 Prise en compte de l'hyperstaticité du hourdis

L'hyperstaticité du hourdis est considérée par une redistribution des moments isostatiques en travée et sur appuis. Les coefficients de redistribution adoptés sont : 0,80 en travée, 0,50 sur appuis (CALGARO, 2000).

Les calculs sont menés dans l'hypothèse de fissuration préjudiciable aux États Limites de Service (ELS).

| Désignation                   | Appui | Travée | Unité   |
|-------------------------------|-------|--------|---------|
| Moment isostatique            | 66,06 |        | KN.m/ml |
| Coefficient de redistribution | 0,5   | 0,8    | KN.m/ml |
| Moment de calcul              | 33,03 | 52,85  | KN. /ml |

## V.15 Calcul de la partie en encorbellement

- Evaluation des sollicitations dues charges permanentes

Le calcul est effectué sur une bande d'un mètre linéaire de trottoir.

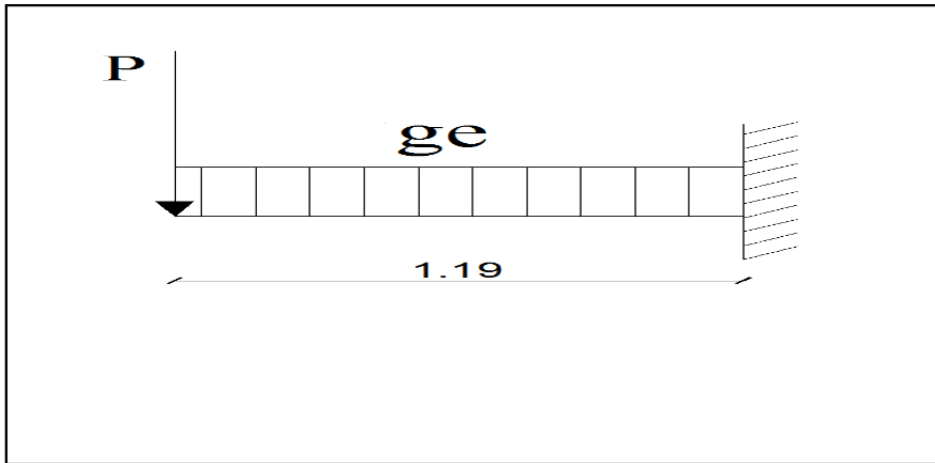
Charges surfaciques sur encorbellement :

$$\begin{aligned} \text{Trottoir : } g_1 &= \rho_b \cdot e = 25 \times 0,20 = 5,00 \text{ kN/m}^2 \\ \text{Dalle : } g_2 &= \rho_b \cdot h_0 = 25 \times 0,20 = 5,00 \text{ kN/m}^2 \\ e &= \text{Épaisseur du trottoir ; } h_0 = \text{hauteur du hourdis ; } \rho_b = \text{masse volumique du béton ;} \end{aligned}$$

$$\text{Total: } g = g_1 + g_2 = 10,00 \text{ kN/m}^2$$

Charge ponctuelle en bout d'encorbellement (corniche + barrière de retenue) :

$$P = \omega_b \times S = 25 \times 0,108 + 0,75 = 3,45 \text{ kN/ml}$$



Moment fléchissant :  $M_G = \frac{g_e l^2}{2} + PL$  donc  $M_G = 4,86 \text{ kN.m/ml}$

Effort tranchant :  $V_G = g_e l + P = 10,45 \text{ kN/ml}$

- Sollicitations dues aux charges d'exploitation

Conformément au Fascicule 61 (Titre 2), le trottoir supporte une charge d'exploitation de :  $q = 4,50 \text{ kN/m}^2$

Moment fléchissant :  $M_Q = \frac{ql^2}{2}$  donc  $M_G = 1,10 \text{ kN.m/ml}$

Effort tranchant :  $V_Q = ql = 3,15 \text{ kN/ml}$

#### V.16 Combinaison des sollicitations

Le calcul en flexion simple à l'ELS sous la combinaison  $G+1,2Q$  donne :

$M_{ser} = 6,18 \text{ kN.m/ml}$  et l'effort tranchant ultime  $V_{UL} = 19,15 \text{ kN/m}$

#### V.17 Vérification de la résistance au cisaillement

La vérification de la contrainte de cisaillement permet de justifier l'absence d'armatures transversales.

$$V_{u,max} \leq V_{u,lim} = 0,07d \frac{f_{c28}}{\gamma_b}$$

En appliquant :  $V_{u,max} = 112,37 \text{ kN/ml}$  et  $V_{u,lim} = 0,07 \times 0,17 \times \frac{30 \times 1000}{1,5} = 238 \text{ kN/ml}$

La condition étant respectée, aucune armature transversale n'est requise dans la dalle

#### V.18 Calcul des armatures du hourdis

Le dimensionnement des armatures du hourdis est réalisé à l'ELS en tenant compte de la fissuration préjudiciable, conformément aux exigences du BAEL 91.

|                                 |                                                                                               | sens lx |        |                | sens ly | Unité |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|----------------|---------|-------|
|                                 |                                                                                               | Appuis  | Travée | encorbellement | Travée  |       |
| Données                         |                                                                                               |         |        |                |         |       |
| Largeur                         | B                                                                                             | 100     |        |                |         | cm    |
| Hauteur                         | H                                                                                             | 20      |        |                |         | cm    |
| Hauteur utile acier tendus      | d= h-0,03                                                                                     | 17      |        |                |         | cm    |
| Moment de service               | M <sub>ser</sub>                                                                              | 0,03    | 0,05   | 0,006          | 0,02    | MN.m  |
| Limite d'élasticité des aciers  | F <sub>e</sub>                                                                                | 400     |        |                |         | Mpa   |
| Limite de résistance du béton   | f <sub>c28</sub>                                                                              | 30      |        |                |         | MPa   |
| Calculs                         |                                                                                               |         |        |                |         |       |
| Résistance traction du béton    | f <sub>t28</sub> = 0.6+0.06f <sub>c28</sub>                                                   | 2,4     |        |                |         | MPa   |
| Contrainte de calcul du béton   | σ <sub>b</sub> = 0.6f <sub>c28</sub>                                                          | 18      |        |                |         | MPa   |
| Contrainte de calcul des aciers | $\bar{\sigma}_s = \min \left\{ \frac{2f_e}{3} ; 110\sqrt{1,6f_{t28}} \right\}$                | 215,555 |        |                |         | MPa   |
| Coefficient α                   | $\bar{\alpha} = \frac{15\sigma_b}{15\sigma_b + \bar{\sigma}_s}$                               | 0,556   |        |                |         |       |
| Moment résiduel                 | $M_{srb} = \frac{bd\bar{\alpha}}{2} \bar{\sigma}_b \left( 1 - \frac{\bar{\alpha}}{3} \right)$ | 0,14    |        |                |         | MN    |
| Bras de levier                  | $Z = d \left( 1 - \frac{\bar{\alpha}}{3} \right)$                                             | 13,85   |        |                |         | cm    |

| <i>Vérification</i>          | <i>Mser &lt; Mrsb</i>                       | Sans armature comprimées |          |         |         |     |
|------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|----------|---------|---------|-----|
| <b>Section des aciers</b>    | $A_{ser} = \frac{M_{ser}}{Z\bar{\sigma}_s}$ | 11,07                    | 17,70    | 2,07    | 7,67    | cm² |
| <b>Section minimale</b>      | <b>A<sub>min</sub></b>                      | 2,346                    |          |         |         | cm² |
| <b>Armatures principales</b> | <b>As</b>                                   | 11,07                    | 17,70    | 2,07    | 7,67    | cm² |
|                              | Choix                                       | 8 HA 14                  | 14 HA 14 | 8 HA 14 | 5 HA 14 |     |
| Armatures de répartition     | <b>As</b>                                   | 2,77                     | /        | /       | /       | cm² |
|                              | Choix                                       | 4 HA 10                  | /        | /       | /       |     |

## 02. Dimensionnement des poutres principales

Les tabliers de ponts à poutres constituent des structures tridimensionnelles complexes pour lesquelles diverses approches analytiques ont été proposées. En pratique, leur étude est généralement décomposée en deux analyses complémentaires :

- Une étude dans le sens transversal, visant à déterminer la répartition des charges entre les poutres principales ;
- Une étude dans le sens longitudinal, portant sur le comportement d'une poutre représentative sous les sollicitations globales.

Les sollicitations longitudinales sont pondérées par un coefficient de répartition transversale (CRT) afin d'obtenir les sollicitations moyennes agissant sur chaque poutre  
 $\text{Sollicitation moyenne} = \text{CRT} \times \text{Sollicitation globale}$ .

### 2.5.2.1. Détermination du coefficient de répartition transversale

Les entretoises jouent un rôle essentiel dans la redistribution des efforts entre les poutres principales. En leur absence, cette fonction est assurée par le hourdis. Afin de quantifier cette redistribution, on introduit un coefficient correctif, appelé coefficient de répartition transversale (CRT), qui exprime la part de surcharge transmise à une poutre donnée.

Deux grandes approches de calcul sont distinguées selon le comportement supposé de la section transversale :

- Méthodes à section indéformable, représentées par la méthode de Courbon ;
- Méthodes à section déformable, dont la plus utilisée est celle de Guyon-Massonnet.

La méthode de Courbon convient particulièrement aux tabliers comportant plusieurs entretoises intermédiaires, tandis que celle de Guyon-Massonnet est recommandée lorsque le tablier présente une flexibilité transversale notable.

Dans le cadre de cette étude, le tablier ne comportant pas d'entretoises intermédiaires, la méthode de Guyon-Massonnet a été adoptée.

### 2.5.2.2. Méthode de Guyon-Massonnet

Lorsque la rigidité à la torsion des éléments d'un tablier de pont ne peut être négligée, la section transversale doit être considérée comme déformable. La méthode de Guyon-Massonnet (élaborée initialement par Guyon en 1946 et complétée par Massonnet en 1954 sous forme de tableaux numériques) permet alors de déterminer la répartition des charges transversales dans une dalle ou un réseau de poutres.

Cette méthode repose sur deux principes fondamentaux :

Principe d'équivalence structurelle : le tablier réel est remplacé par un système continu présentant les mêmes rigidités moyennes en flexion et en torsion que la structure réelle.

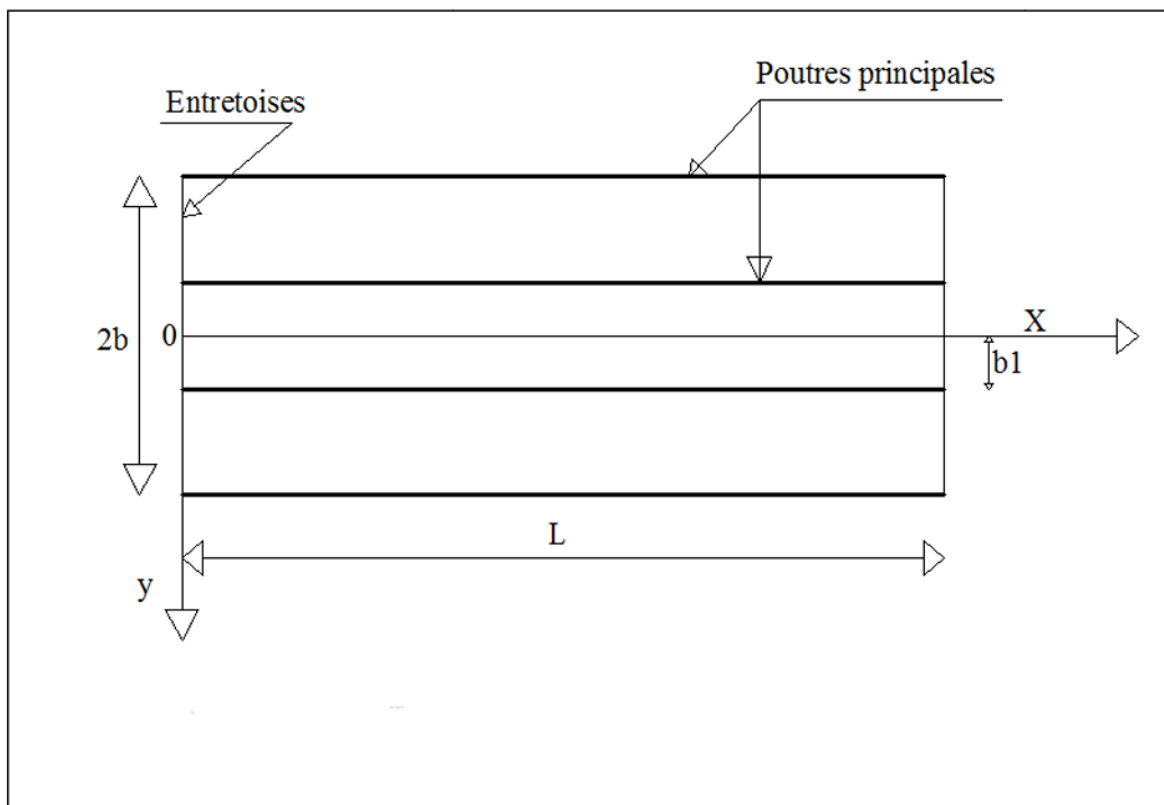
Principe de répartition sinusoïdale : la distribution transversale des charges est assimilée à celle produite par une charge longitudinale à répartition sinusoïdale, exprimée par :

$$P' = P \sin \left( \frac{\pi n y}{L} \right)$$

où : P est la charge constante, L la portée du pont, et n le rang de la demi-onde considérée.

### 2.5.2.3. Paramètres fondamentaux du modèle

On considère une travée indépendante de portée L et de largeur totale 2b, constituée d'un réseau croisé formé de n poutres longitudinales (de portée L) et de deux entretoises de rive (de portée 2b et espacées de L).



Toutes les poutres et entretoises sont supposées identiques et caractérisées par leurs rigidités à la flexion et à la torsion :

- Rigidité à la flexion des poutres :  $B_P = EI_P$
- Rigidité à la torsion des poutres :  $C_P = GK_P$

De la même manière, toutes les entretoises sont considérées identiques et sont caractérisées par :

- Rigidité à la flexion des entretoises :  $B_E = EI_E$

- Rigidité à la torsion des entretoises :  $C_E = GK_E$

Les symboles utilisés sont : E module d'Young ; G module de cisaillement (module de torsion), donné par  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

Où  $\nu$  est le coefficient de Poisson ;

$I_P, I_E$ , moments d'inertie en flexion des poutres et des entretoises respectivement ;

$K_P, K_E$  : moments d'inertie en torsion des poutres et des entretoises respectivement.

Par unité de longueur, on définit les rigidités de flexion et de torsion suivantes :

Rigidités de flexion par unité de longueur :

$$\rho_P = \frac{B_P}{b_1} = \frac{EI_P}{b_1} , \rho_E = \frac{B_E}{L_1} = \frac{EI_E}{L_1}$$

Rigidités de torsion par unité de longueur :

$$\gamma_P = \frac{C_P}{b_1} = \frac{GK_P}{b_1} , \gamma_E = \frac{C_E}{L_1} = \frac{GK_E}{L_1}$$

Dans la suite, et par simplification adoptée fréquemment en phasage de calcul préliminaire, on suppose  $\nu = 0$ , ce qui donne  $G = E/2$ . Dans ce cas particulier, les rigidités s'expriment simplement en fonction de E, I et K.

Le comportement structural transverse est caractérisé par deux paramètres adimensionnels principaux :

- 1) Paramètre de torsion  $\alpha$ , qui met en relation les rigidités de torsion et de flexion des

$$\text{éléments : } \alpha = \frac{\gamma_P + \gamma_E}{2\sqrt{\rho_P \rho_E}}$$

- 2) Paramètre d'entretoisement  $\theta$ , qui rend compte de l'importance de l'entretoisement

$$\text{relatif à la portée longitudinale : } \theta = \frac{B^4 \rho_P}{L \sqrt{\rho_E}}$$

Où b représente la demi-largeur utile du tablier et L la portée longitudinale considérée.

Le coefficient de répartition transversale (CRT), noté K ou  $K_n$ , est ensuite déterminé à partir des tableaux de Guyon–Massonnet. Ce coefficient dépend des paramètres suivants :

La valeur du paramètre de torsion  $\alpha$  ;

La valeur du paramètre d'entretoisement  $\theta$  ;

L'excentricité de la charge e (position transversale de l'action) ;

L'ordonnée  $y$  de la poutre considérée (position de la poutre dans la section transversale).

Deux cas limites sont reconnus :

Pour  $\alpha = 0$  on obtient la valeur  $K_0$ .

Pour  $\alpha = 1$  on obtient la valeur  $K_1$ .

Pour des valeurs intermédiaires de  $\alpha$ , l'interpolation proposée par Massonnet s'écrit :

$$K = K_0 + (K_1 - K_0)\alpha^{\frac{1}{2}}$$

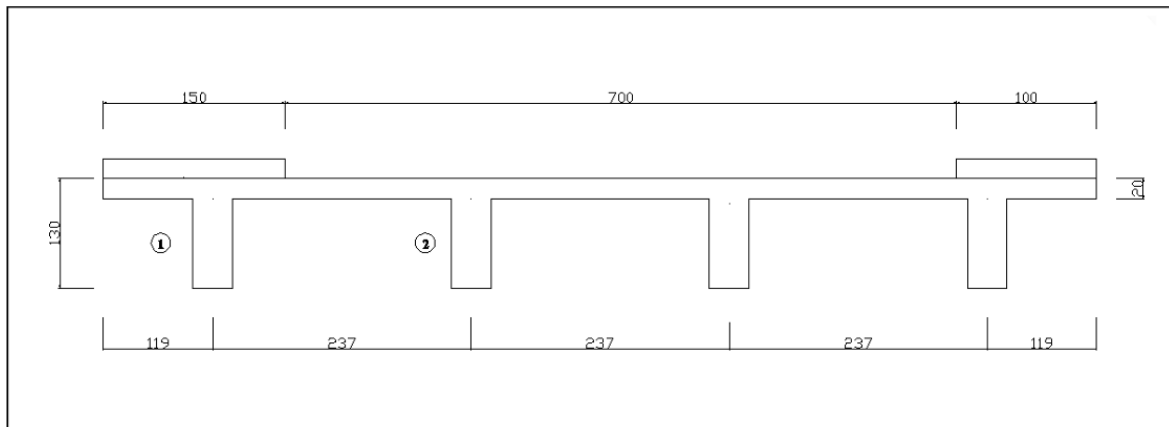
Et, pour une précision accrue, la formulation alternative de Sattler peut être utilisée :

$$\begin{cases} K = K_0 + (K_1 - K_0)\alpha^{0,05} & 0 < \theta \leq 0,1, \\ K = K_0 + (K_1 - K_0)\alpha(1 - e^{-\theta_0}), & 0,1 < \theta \leq 1, \text{ Avec } \theta_0 = \frac{0,065 - \theta}{0,663} \\ K = K_0 + (K_1 - K_0)\alpha^{\frac{1}{2}} & \theta > 1, \end{cases}$$

Avec  $\theta_0$  et les constantes numériques définies selon la référence de Sattler pour une poutre d'ordonnée  $y$ , on procède à une interpolation linéaire sur les valeurs de  $y$  données dans les tableaux de Guyon–Massonnet, afin de déterminer le coefficient  $K$  correspondant à la position de la poutre.

De plus, une interpolation linéaire peut également être effectuée par rapport au paramètre d'entretoisement  $\theta$  lorsque la valeur calculée de  $\theta$  ne coïncide pas exactement avec celles figurant dans les tableaux expérimentaux.

#### 2.5.2.4. Calcul numérique des CRT



#### Détermination du Coefficient de Répartition Transversale (CRT)

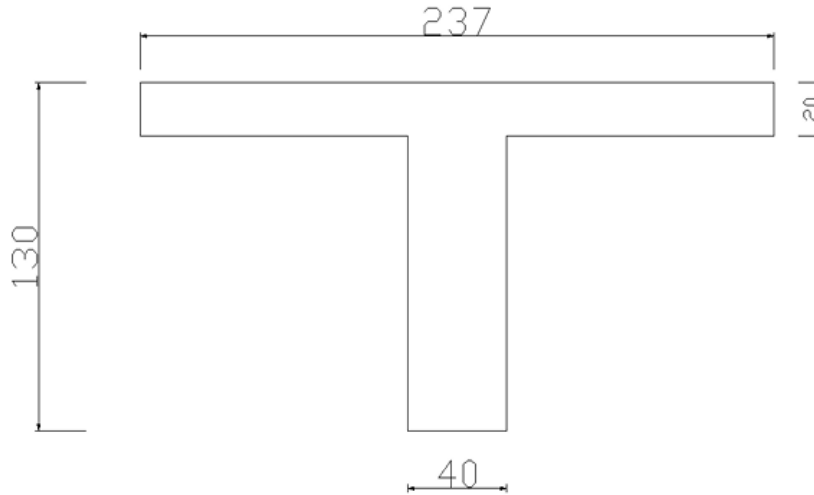
L'étude porte sur la détermination du coefficient de répartition transversale (CRT) sous l'effet des charges, pour deux poutres représentatives : la poutre de rive n°1 et la poutre intermédiaire n°2.

##### 1. Calcul des paramètres fondamentaux

### Données géométriques

$$2b = 7 + 1,5 + 1 = 9,5 \Rightarrow b = 4,75 ; b_1 = 118,5 ; b_0 = 237 ; n=4$$

❖ Moment d'inertie section en T



$$b_a = 0,4\text{m} ; h_d = 0,2\text{m} ; h_p = 1,3\text{m}$$

$$b_0 - b_a = 2,37 - 0,4 = 1,19\text{m}$$

❖ Le moment d'inertie de flexion de la section en T est donné par :

$$I_P = I_x = \frac{1}{3} [(b_0 - b_a) \times h_d^3 + b_a \times h_p^3] - \frac{1[(b_0 - b_a) \times h_d^3 + b_a \times h_p^3]^2}{4[(b_0 - b_a) \times h_d + b_a \times h_p]}$$

$$\text{D'où : } I_P = 0,146 \text{ m}^4$$

❖ Rigidité à la flexion

$$\text{La rigidité de flexion est exprimée par : } \rho_P = \frac{I_P}{b_1} E = \frac{0,146}{1,28} E = 114,06 \cdot 10^{-3} E$$

$$\text{Ainsi : } \rho_P = 114,06 \cdot 10^{-3} E$$

❖ Moment d'inertie de torsion  $K_P$  la section en T est assimilée à deux éléments.

Le moment d'inertie de torsion de chaque élément est donné par :

$$\Gamma_1 = \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \times b_0 \times h_d^3 = \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \times 2,56 \times 0,2^3 = 3,4 \cdot 10^{-3}$$

$$\Gamma_2 = K \left[ \frac{2(h_p - h_d)}{b_a} \right] \times (h_p - h_d) \times b_a^3 = K(5,5) \times 1,1 \times 0,4^3$$

Le coefficient de forme K est obtenu selon la formule de VIPP :

$$K = \frac{1}{3} - \left(0,051 + \frac{0,168}{5,5}\right) e^{-0,13 \times 5,5} = 0,2941 \text{ ainsi : } \Gamma 2 = 0,2941 \times 1,1 \times 0,4^3 = 20,7.10^{-3}$$

Le moment d'inertie de torsion total est donc :  $K_P = \Gamma 1 + \Gamma 2 = 24,1.10^{-3} \text{ m}^4$

#### ❖ Rigidité à la torsion

$$\gamma_P = \frac{K_P}{2b_1} E = \frac{24,1.10^{-3}}{2 \times 1,28} E = 9,41.10^{-3} E$$

#### ❖ Paramètre des entretoises

Pour les entretoises, la rigidité est exprimée par :

$$\gamma_E = \rho_E = \frac{h_d^3}{12} E = \frac{0,2^3}{12} E = 0,66.10^{-3} E$$

Calcul des paramètres de torsion et d'entretoisement

$$\text{Le paramètre de torsion : } \alpha = \frac{\gamma_P + \gamma_E}{2\sqrt{\rho_P \rho_E}} = \frac{9,41 + 0,66}{2\sqrt{114,06 \times 0,66}} = 0,58$$

$$\text{Le paramètre d'entretoisement : } \theta = \frac{b_4}{L} \sqrt{\frac{\rho_P}{\rho_E}} = \frac{4,75}{18} \times \left(\frac{114,06}{0,66}\right)^{\frac{1}{4}} = 0,95$$

Étant donné que  $\theta = 0,95 > \alpha = 0,3$  la méthode de Guyon–Massonnet est adoptée pour la détermination des coefficients de répartition transversale (CRT).

#### 2. Calcul des CRT pour la poutre de rive N°1 ( $y = 3,55$ )

Interpolation sur le paramètre  $\alpha$

D'après Sattler, pour  $0,1 \leq \theta \leq 1$  :  $K = K_0 + (K_1 - K_0) \times \alpha (1 - e^{\theta_0})$  avec  $\theta_0 = \frac{0,065 - \theta}{0,663} = -1,33$

$$\text{Soit : } K_\alpha = K_0 + (K_1 - K_0) \times 0,58 \times 0,73 = 0,58K_0 + 0,42K_1$$

$\theta = 0,95$  les abaques de Massonnet fournissent directement les valeurs du coefficient  $K$  pour ce rapport  $\theta = 0,95$ .

Il n'est donc pas nécessaire d'effectuer une interpolation pour déterminer les valeurs de  $K$ .

#### ❖ Interpolation sur la position $y$ de la poutre

Pour  $y = 3,55$  et  $b = 4,75$  on obtient :  $y = \frac{3,55b}{4,75} \approx 0,81b$  ainsi on constate donc que

$0,75b \leq y \leq b$ . Les tableaux de Massonnet fournissent les valeurs du coefficient  $K$  pour ces deux abscisses particulières ( $y = 0,75b$  et  $y = b$ ) Afin de déterminer la valeur correspondante à  $y=0,81b$ , on procède à une interpolation linéaire selon la relation suivante :

$$K_{0,75b} = K_{|y=\frac{3b}{4}} \text{ et } K_b = K_{|y=b}$$

$$K_{0,81b} = K_{0,75b} + (K_b - K_{0,75b}) \left( \frac{0,81 - 0,75}{1 - 0,75} \right)$$

Ce qui conduit numériquement à :  $K_{0,81b} = 0,76K_{0,75b} + 0,24K_b$

De façon équivalente, en notation avec l'ordonnée :  $K_{0,81b} = 0,76K_{|y=\frac{3b}{4}} + 0,24K_{|y=b}$

### Synthèse de la procédure d'interpolation

La détermination du coefficient  $K$  pour la poutre de rive s'effectue en suivant les étapes suivantes :

Lecture dans les abaques de Massonnet des valeurs  $K_{0,75b}$  et  $K_b$  correspondant à  $\theta = 0,95$ .

Interpolation sur  $\alpha$  selon :  $K\alpha = 0,58 K_0 + 0,42K_1$ .

Interpolation sur  $y$  pour obtenir :  $K_{0,81b} = 0,76 K_{0,75b} + 0,24K_b$ .

Détermination finale de  $K=K(e)$  pour  $\theta=0,95$  à partir des valeurs précédentes.

Cette courbe  $K(e)$  représente la ligne d'influence du coefficient  $K$  sur la poutre principale.

| <b><math>\theta=0,95</math></b> |                          |           |              |             |             |          |            |            |             |          |
|---------------------------------|--------------------------|-----------|--------------|-------------|-------------|----------|------------|------------|-------------|----------|
| <b>e</b>                        |                          | <b>-b</b> | <b>-3b/4</b> | <b>-b/2</b> | <b>-b/4</b> | <b>0</b> | <b>b/4</b> | <b>b/2</b> | <b>3b/4</b> | <b>b</b> |
| <b>K<sub>0</sub></b>            | <b>K<sub>3b/4</sub></b>  | -0,1299   | -0,1694      | -0,1823     | -0,0942     | 0,2205   | 0,9051     | 2,0152     | 3,304       | 4,3036   |
|                                 | <b>K<sub>b</sub></b>     | 0,1017    | -0,1299      | -0,3619     | -0,552      | -0,5476  | -0,0352    | 1,4425     | 4,3036      | 8,4478   |
|                                 | <b>K<sub>0,81b</sub></b> | -0,074    | -0,160       | -0,225      | -0,204      | 0,036    | 0,679      | 1,878      | 3,544       | 5,298    |
| <b>K<sub>1</sub></b>            | <b>K<sub>3b/4</sub></b>  | 0,0961    | 0,1463       | 0,2351      | 0,3985      | 0,6801   | 1,1255     | 1,7402     | 2,3445      | 2,592    |
|                                 | <b>K<sub>b</sub></b>     | 0,0608    | 0,0961       | 0,1596      | 0,2316      | 0,5064   | 0,9021     | 1,5641     | 2,592       | 3,98     |
|                                 | <b>K<sub>0,81b</sub></b> | 0,088     | 0,134        | 0,217       | 0,358       | 0,638    | 1,072      | 1,698      | 2,404       | 2,925    |
| <b>K<sub>α</sub></b>            | <b>K</b>                 | -0,006    | -0,036       | -0,040      | 0,032       | 0,289    | 0,844      | 1,802      | 3,065       | 4,302    |

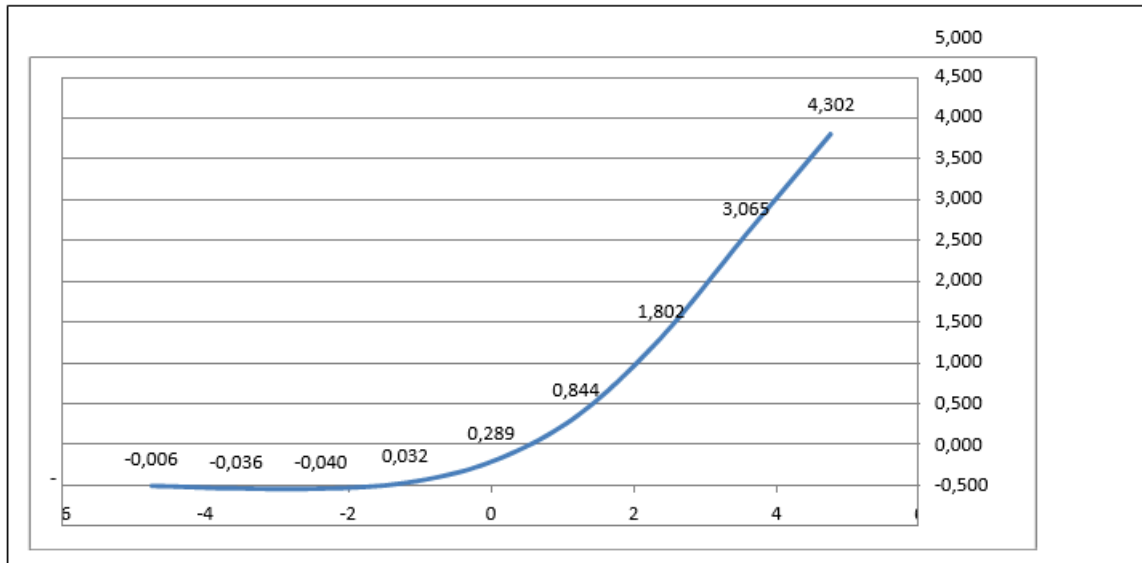
Tableau de  $K$  pour  $\theta=0,95$  après 2 interpolations (sur  $y$  et sur  $\alpha$ )

On obtient

|          |              |              |              |              |          |             |             |             |             |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>e</b> | <b>-4,75</b> | <b>-3,56</b> | <b>-2,37</b> | <b>-1,19</b> | <b>0</b> | <b>1,19</b> | <b>2,37</b> | <b>3,56</b> | <b>4,75</b> |
| <b>k</b> | -0,006       | -0,036       | -0,040       | 0,032        | 0,289    | 0,844       | 1,802       | 3,065       | 4,302       |

Tableau de  $K=K(e)$  après 2 interpolations

On trace la courbe  $K=K(e)$  qui représente la ligne d'influence (Li) de K sur la poutre principale.



Ligne d'influence de K pour  $y=3,84$

Détermination des CRT pour la poutre de rive N°1

| Charges                 | $\omega$ | K    | CRT $\eta$  | Caractéristiques        | Cas le plus défavorable     |
|-------------------------|----------|------|-------------|-------------------------|-----------------------------|
| <b>A(L)</b>             | 5,16     | 0,74 | <b>0,18</b> | $a_1=1$ et $L_{a1}=7m$  | 2voies chargées             |
| <b>q<sub>rt</sub></b>   | 3,71     | 2,48 | <b>0,62</b> | $L_{tr}=1,5m$           | 2 trottoirs chargés         |
| <b>B<sub>c</sub></b>    | 4,38     | 2,19 | <b>0,55</b> | $b_c=1,1m$ et $P=12t$   | 2 files de B <sub>c</sub>   |
| <b>M<sub>c120</sub></b> | 5,86     | 1,47 | <b>0,37</b> | $L_{MC}=1m$ et $P=110t$ | 1 char de M <sub>c120</sub> |

### 3. Calcul des CRT pour la poutre intermédiaire n°2 ( $y = 1,18 m$ )

#### ❖ Courbe de K

Les paramètres  $\alpha$  et  $\theta$  restent identiques à ceux de la poutre de rive, à savoir :  $\alpha = 0,58$  et  $\theta=0,95$ . Par conséquent, les interpolations sur  $\alpha$  et  $\theta$  s'effectuent de la même manière que pour la poutre de rive :  $K|_{\alpha=0,58} = 0,58K_0 + 0,42K_1$ , et si nécessaire la valeur à  $\theta = 0,95$   $K|_{\alpha=0,95} = 0,58K|_{\theta=0,90} + 0,42K|_{\theta=1}$ .

Seule la position transversale change : pour la poutre intermédiaire on a  $y = 1,18 m$ .

Avec  $b = 4,75$  ;  $y = 4,751$  ;  $\frac{y}{b} = \frac{1,18}{4,75} \approx 0,25$ .

Les tableaux de Massonnet donnent des valeurs tabulées pour des positions normalisées telles que  $y = 0,25b$  ;  $y = 0,5b$  ; etc. On procède donc à une interpolation linéaire entre les

deux valeurs les plus proches. Par exemple, pour une position normalisée 0,27b la formule

$$\text{d'interpolation s'écrit : } K_{0,27b} = K_{0,25b} + (K_{0,5b} - K_{0,25b}) \left( \frac{0,27-0,25}{0,5-0,25} \right)$$

Ce qui conduit numériquement à :  $K_{0,27b} = 0,92K_{0,25b} + 0,08K_{0,5b}$ .

De façon équivalente, en notation avec l'ordonnée :  $K_{0,27b} = 0,92K_{|y=0,25b} + 0,08K_{|y=0,5b}$

Pour notre cas,  $y/b \approx 0,25$  donc la valeur de K pour la poutre n°2 est très proche de  $K_{0,25b}$ . Si l'on souhaite une précision supérieure et que la table ne contient pas la valeur exacte à 0,25b on applique l'interpolation linéaire indiquée ci-dessus entre 0,25b et 0,5b.

Synthèse de la procédure d'interpolation.

Si la table ne donne pas K exactement pour  $\theta = 0,95$ , interpoler sur  $\theta$  (moyenne entre 0,90 et 1).

Interpoler linéairement sur la position y/b pour la valeur  $y/b \approx 0,25$  pour la poutre n°2.

Extraire dans les tables de Massonnet les valeurs K correspondant aux paramètres considérés :  $K_0$ ,  $K_1$  (pour  $\alpha$ ),  $K_\theta = 0,90$  et K aux positions normalisées y/b les plus proches.

| <b><math>\theta=0,95</math></b> |                               |           |              |             |             |          |            |            |             |          |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------|-------------|-------------|----------|------------|------------|-------------|----------|
| <b>e</b>                        |                               | <b>-b</b> | <b>-3b/4</b> | <b>-b/2</b> | <b>-b/4</b> | <b>0</b> | <b>b/4</b> | <b>b/2</b> | <b>3b/4</b> | <b>b</b> |
| <b><math>K_0</math></b>         | <b><math>K_{b/4}</math></b>   | -0,552    | -0,0942      | 0,4281      | 1,0911      | 1,8308   | 2,2413     | 1,7788     | 0,9051      | -0,0352  |
|                                 | <b><math>K_{b/2}</math></b>   | -0,3619   | -0,1823      | 0,049       | 0,4281      | 1,0283   | 1,7788     | 2,2821     | 2,0152      | 1,4425   |
|                                 | <b><math>K_{0,27b}</math></b> | -0,537    | -0,101       | 0,398       | 1,038       | 1,767    | 2,204      | 1,819      | 0,994       | 0,083    |
| <b><math>K_1</math></b>         | <b><math>K_{b/4}</math></b>   | 0,2816    | 0,3985       | 0,5936      | 0,9079      | 1,3202   | 1,6148     | 1,4265     | 1,1255      | 0,9021   |
|                                 | <b><math>K_{b/2}</math></b>   | 0,1596    | 0,2351       | 0,3654      | 0,5936      | 0,9526   | 1,4265     | 1,8092     | 1,7402      | 1,5641   |
|                                 | <b><math>K_{0,27b}</math></b> | 0,266     | 0,377        | 0,563       | 0,865       | 1,264    | 1,567      | 1,429      | 1,152       | 0,937    |
| <b><math>K_\alpha</math></b>    | <b>K</b>                      | -0,200    | 0,100        | 0,467       | 0,965       | 1,556    | 1,937      | 1,655      | 1,060       | 0,442    |

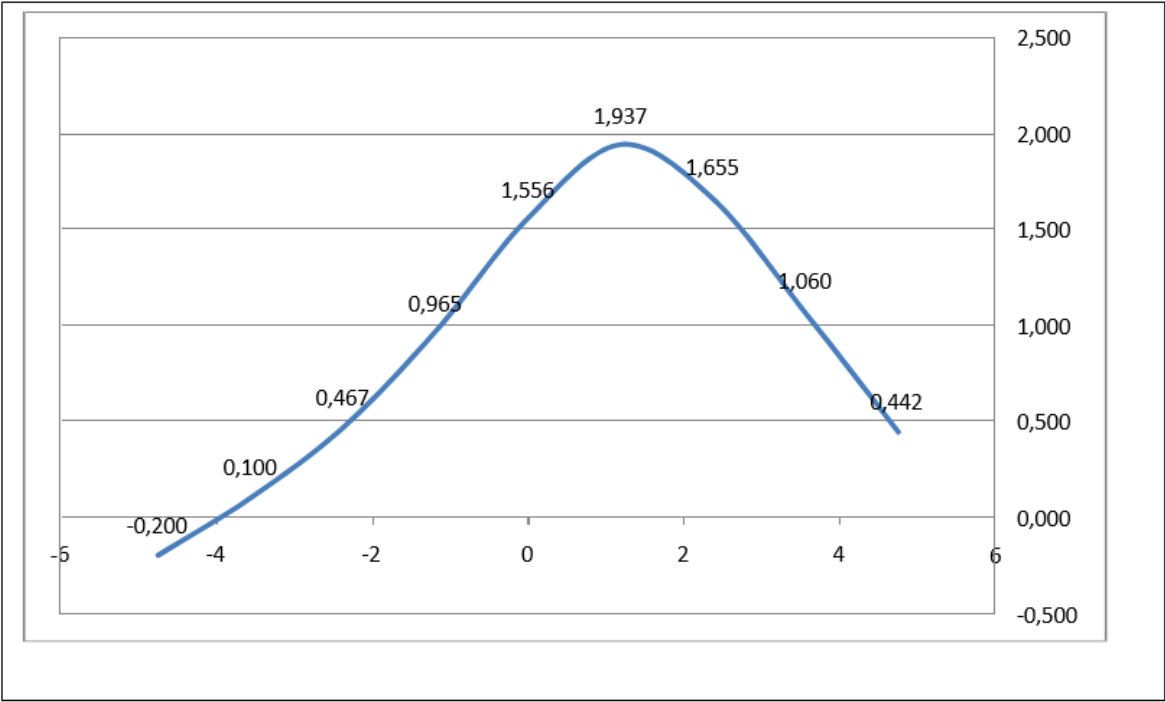
Tableau de K pour  $\theta=0,95$  après 2 interpolations (sur y et sur  $\alpha$ )

On obtient

| <b>e</b> | <b>-4,75</b> | <b>-3,56</b> | <b>-2,37</b> | <b>-1,19</b> | <b>0</b> | <b>1,19</b> | <b>2,37</b> | <b>3,56</b> | <b>4,75</b> |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>K</b> | -0,200       | 0,100        | 0,467        | 0,965        | 1,556    | 1,937       | 1,655       | 1,060       | 0,442       |

Tableau N° :  $K=K(e)$  après 2 interpolations

On trace la courbe  $K=K(e)$  qui représente la ligne d'influence (Li) de K sur la poutre principale.



Ligne d'influence de K pour  $y= 1,18$

Détermination des CRT pour la poutre N°2

| Charges                 | $\omega$ | K     | CRT $\eta$  | Caractéristiques        | Cas le plus défavorable     |
|-------------------------|----------|-------|-------------|-------------------------|-----------------------------|
| <b>A(L)</b>             | 8,22     | 1,17  | <b>0,29</b> | $a_1=1$ et $L_{a1}=7m$  | 2voies chargées             |
| <b>q<sub>rt</sub></b>   | 0,04     | 0,04  | <b>0,01</b> | $L_{tr}=1,5m$           | 2 trottoirs chargés         |
| <b>B<sub>c</sub></b>    | 6,76     | 3 ,38 | <b>0,84</b> | $b_c=0,95$ et $P=12t$   | 2 files de B <sub>c</sub>   |
| <b>M<sub>c120</sub></b> | 8,13     | 2,03  | <b>0,50</b> | $L_{MC}=1m$ et $P=110t$ | 1 char de M <sub>c120</sub> |

Comparaison et CRT final

La comparaison des résultats obtenus pour les deux poutres conduit à retenir les valeurs les plus défavorables des coefficients de répartition transversale, afin de dimensionner une poutre équivalente unique. Ainsi, l'ensemble des poutres principales est conçu avec un même ferrailage homogène, garantissant la symétrie et la simplicité de mise en œuvre.

## 03. Sollicitations dues aux charges permanentes

|                                                      | Hauteur (m) | épaisseur (m) | longueur (m) | P    | G (kN)  |
|------------------------------------------------------|-------------|---------------|--------------|------|---------|
| Corniche                                             | 0,1727      |               |              | 25   | 4,3175  |
| contre corniche                                      | 0,0635      |               |              | 25   | 1,5875  |
| Béton de remplissage                                 | 0,2937      |               |              | 25   | 7,3425  |
| Bordure T2                                           | 0,0388      |               |              | 25   | 0,97    |
| BN4                                                  |             |               |              | 0,65 | 0,65    |
| Hourdis                                              | 0,2         | 2,16          |              | 25   | 10,8    |
| poutre                                               | 1,1         | 0,4           |              | 25   | 11      |
| Etanchéité                                           | 0,36        |               |              | 0,12 | 0,0432  |
| Roulement                                            | 0,07        | 0,68          |              | 22,5 | 1,071   |
| TOTAL des charges permanentes agissant sur la poutre |             |               |              |      | 37,7817 |

Les charges permanentes agissant sur les poutres sont évaluées à partir des expressions

classiques :  $M_{\max G} = \frac{gl^2}{8}$  ;  $V_{\max G} = \frac{gl}{2}$

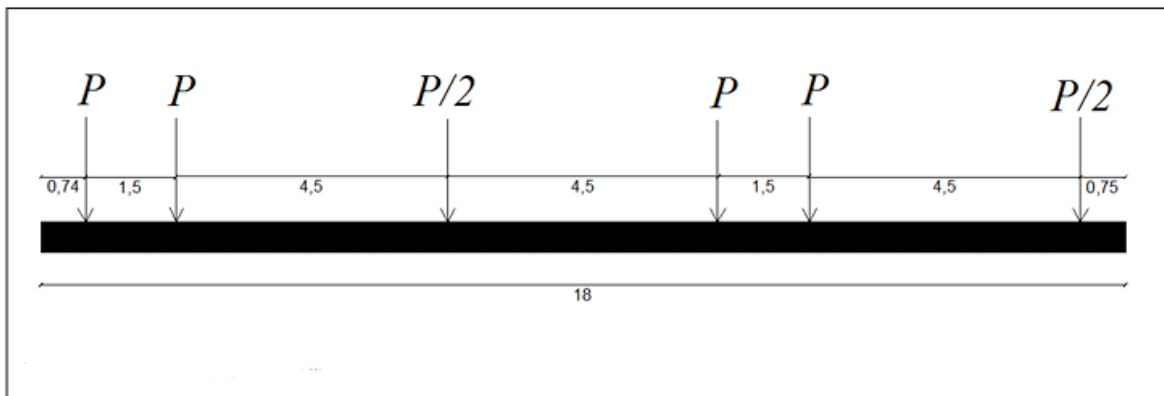
## 04. Sollicitations dues aux charges de chaussée

– Système de charge A

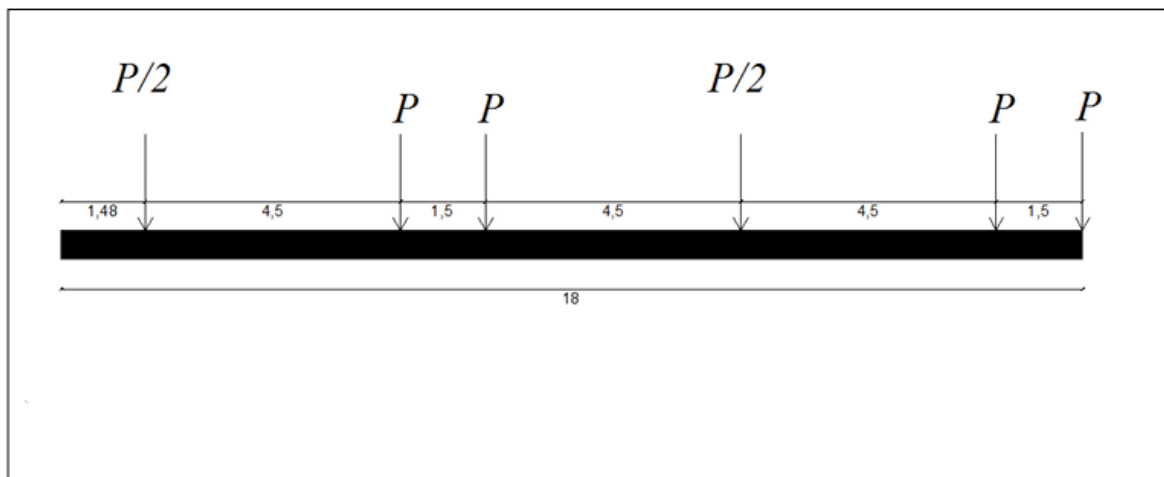
$A(L) = 14,30 \text{ kN/m}^2$   $M_{\max A} = \frac{q_A l^2}{8}$  ;  $V_{\max A} = \frac{q_A l}{2}$

– Système de charge Bc

Selon le théorème de BARRE, pour un convoi roulier constitué d'essieux discrets, le moment fléchissant absolu engendré par le convoi sur une poutre apparaît généralement sous un essieu  $i$  et en une position telle que la distance entre cet essieu et la résultante  $R$  du convoi est symétrique par rapport aux appuis de la poutre. Dans la pratique, pour les évaluations rapides, on retient la recherche de la position de l'essieu  $P_i$  qui maximise le moment sur la ligne d'influence. Pour les vérifications, la valeur nominale d'un essieu typique est prise ici comme  $P=12 \text{ t}=120 \text{ kN}$ .



Pour  $P = 120 \text{ kN}$  et  $17,44 < L_c < 18,38$  donc  $M = P \left( L_c + \frac{2,88}{L_c} - 7,875 \right)$



$$T_{BC} = 2 \sum P_i Y_i$$

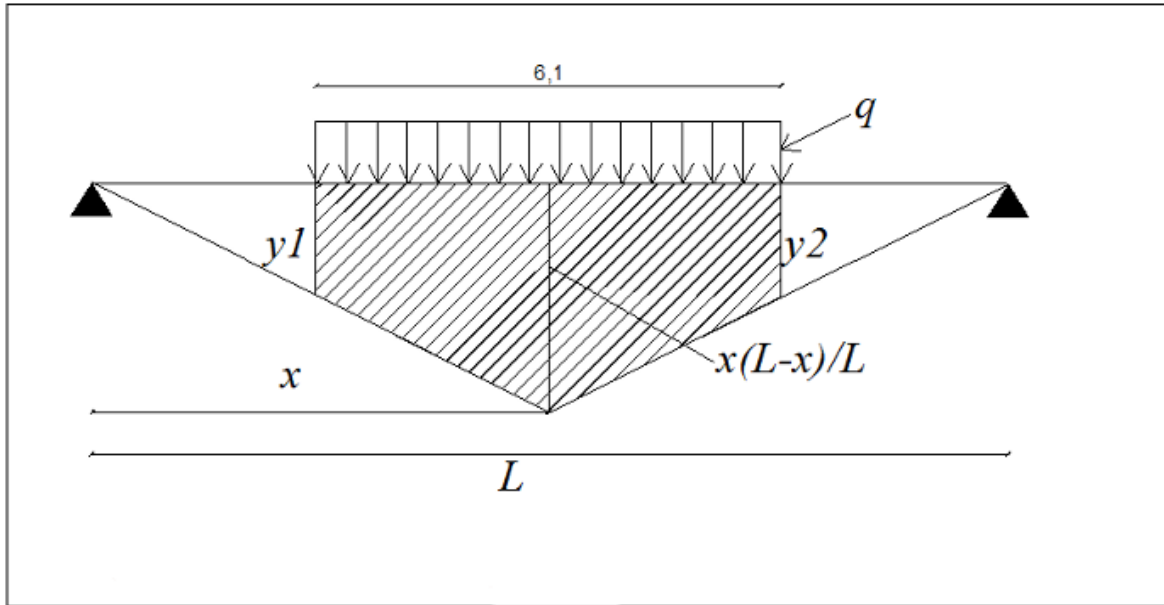
Où  $Y_i$  désigne les ordonnées des projections des charges sur la ligne d'influence.

– Charge militaire Mc120

Compte tenu de la portée de la travée, un seul véhicule peut être disposé sur le tablier :

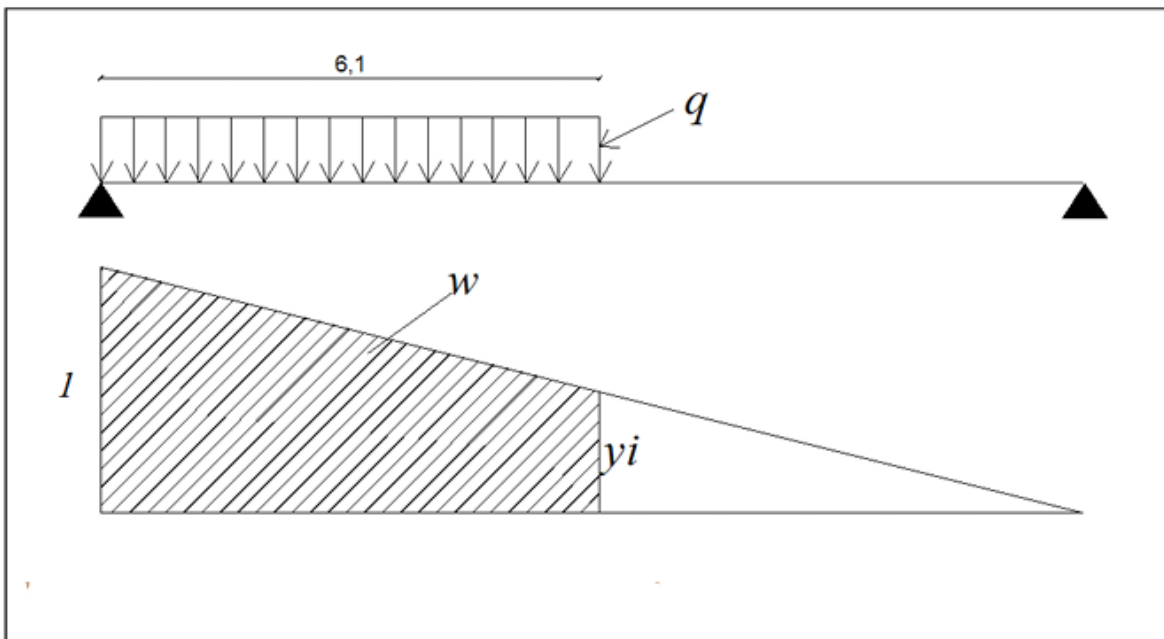
$$M_{Mc120} = \sum q \omega_i$$

Où  $\omega_i$  représente la surface sous la ligne d'influence.



– Effort tranchant

$$T_{MC120} = \sum q\omega_i$$



Calcul de sollicitation

Combinaison des sollicitations

Les valeurs de calcul des moments fléchissant et efforts tranchants sont obtenues selon :

$$M = \gamma_c M_G + \sup (\gamma_Q C_n M_{AL} + \gamma_Q C_n M_{tr} ; \gamma_Q C_n M_B + \gamma_Q C_n M_{tr} ; \gamma_Q C_n M_{Mc120})$$

$$T = \gamma_c T_G + \sup (\gamma_Q C_n T_{AL} + \gamma_Q C_n T_{tr} ; \gamma_Q C_n T_B + \gamma_Q C_n T_{tr} ; \gamma_Q C_n T_{Mc120})$$

Avec :

$\gamma_G, \gamma_Q$ : coefficients de pondération des charges permanentes et d'exploitation;

$C_n$ : coefficient de valeur nominale des charges (D1 du BAEL 91-99) ;

$M$  : Moment fléchissant et  $T$  : effort tranchant.

Les résultats des différents calculs de moments et d'efforts tranchants pour chaque type de charge sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Ces valeurs seront ensuite utilisées pour le dimensionnement des armatures longitudinales et des étriers des poutres principales.

| Type de chargement | Sollicitations non pondérées |          | bc  | $\delta$ | $\gamma Q1$ | Poutre 1 $\gamma=3,84$ |                   |                   | Poutre 2 $\gamma=1,28$ |                   |                  |
|--------------------|------------------------------|----------|-----|----------|-------------|------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------|
|                    | M (KN/ml)                    | T (KN)   |     |          |             | CRT $\eta$             | M (KN/ml)         | T (KN)            | CRT $\eta$             | M (KN/ml)         | T (KN)           |
| G (CRT=1 ; (n=4))  | 1530,16                      | 340,0353 |     |          | 1,35        | 1                      | <b>2065,71445</b> | <b>459,047655</b> | 1                      | 2065,71445        | 459,047655       |
| AL                 | 579,15                       | 128,7    |     |          | 1,6         | 0,31                   | 291,229714        | 64,7177143        | 0,29                   | 272,035029        | 60,4522286       |
| Trottoir           | 91,125                       | 20,25    |     |          | 1,6         | 0,31                   | <b>45,0765</b>    | <b>10,017</b>     | 0,00333333             | 0,486             | 0,108            |
| Bc                 | 246,80                       | 364,48   | 1,1 | 1,34     | 1,6         | 0,55                   | 318,67064         | 470,625324        | 0,21                   | 122,957393        | <b>181,58831</b> |
| Mc120              | 3310,81                      | 912,99   |     | 1,2      | 1,35        | 0,37                   | 1971,09073        | 543,548597        | 0,51                   | <b>2725,33464</b> | 751,539131       |

Calcul des sollicitations à l'ELU

|                                    |         |
|------------------------------------|---------|
| Moment max a l'ELU $M_x$           | 4836,13 |
| Effort tranchant max à l'ELU $T_x$ | 658,31  |

Calcul des sollicitations à l'ELS

| Type de chargement | Sollicitations non pondérées |          | bc  | $\delta$ | $\gamma Q1$ | poutre 1 $\gamma=3,84$ |                   |                   | Poutr 2 $\gamma=1,28$ |                   |                   |
|--------------------|------------------------------|----------|-----|----------|-------------|------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
|                    | M (KN/ml)                    | T (KN)   |     |          |             | CRT $\eta$             | M (KN/ml)         | T (KN)            | CRT $\eta$            | M (KN/ml)         | T (KN)            |
| G (CRT=1; (n=4))   | 1530,15885                   | 340,0353 |     |          | 1           | 1                      | <b>1530,15885</b> | <b>340,0353</b>   | 1                     | 1530,15885        | 340,0353          |
| AL                 | 579,15                       | 128,7    |     |          | 1,2         | 0,31428571             | 218,422286        | 48,5382857        | 0,29                  | 204,026271        | 45,3391714        |
| Trottoir           | 91,125                       | 20,25    |     |          | 1           | 0,30916667             | <b>28,1728125</b> | <b>176,379414</b> | 0,00333333            | 0,30375           | 0,0675            |
| Bc                 | 246,7973333                  | 364,48   | 1,1 | 1,34     | 1,2         | 0,55                   | 239,002983        | 352,968993        | 0,21                  | 92,2180448        | <b>136,191232</b> |
| Mc120              | 3310,81                      | 912,99   |     | 1,2      | 1           | 0,37                   | 1460,06721        | 402,62859         | 0,51                  | <b>2018,76643</b> | 556,695653        |

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| Moment max a l'ELS Mx | 3577,10 |
|-----------------------|---------|

## Armatures longitudinales

Le calcul est mené en fissuration préjudiciable aux états limites de service sur une section T

| Données                               |                                                                                          |        |      |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------|
| Largeur table de compression          | b                                                                                        | 237    | cm   |
| Largeur ame                           | b <sub>o</sub>                                                                           | 40     | cm   |
| Hauteur table de compression          | h                                                                                        | 130    | cm   |
| Hauteur ame                           | h <sub>o</sub>                                                                           | 20     | cm   |
| Moment de service                     | M <sub>ser</sub>                                                                         | 3,58   | MN.m |
| Résistance du béton à la compression  | f <sub>c28</sub>                                                                         | 30     | Mpa  |
| Elasticité des aciers                 | f <sub>e</sub>                                                                           | 400    | MPa  |
| Hauteur utile aciers tendus           | d                                                                                        | 122    | cm   |
| Hauteur utile aciers comprimées       | d'                                                                                       | 4      | cm   |
| Cas de fissuration                    |                                                                                          | FP     |      |
| Calculs                               |                                                                                          |        |      |
| Résistance du béton à la traction     | $f_{t28} = 0,6 + 0,06f_{c28}$                                                            | 2,4    | MPa  |
| Contrainte limite de calcul du béton  | $\overline{\sigma}_b$                                                                    | 18     | MPa  |
| Contrainte limite de calcul des acier | $\overline{\sigma}_s = \min \left\{ \frac{2f_e}{3}; 110\sqrt{1,6ft28} \right\}$          | 215,56 | MPa  |
| Moment de la table en service         | $M_{ts} = \frac{bh_0^2}{30(d-h_0)} \overline{\sigma}_s \left( d - \frac{h_0}{2} \right)$ | 0,78   | MN.m |

| Comparaisons entre M <sub>ser</sub> et M <sub>ts</sub> | Non:comme une poutre en T                                          |      |     |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------|-----|
| Contrainte moyenne                                     | $\sigma_m = \frac{M_{ser}}{bh_0 \left( d - \frac{h_0}{2} \right)}$ | 6,74 | Mpa |

|                                                    |                                                                                                                                         |            |                 |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|
| Contrainte du béton                                | $\sigma_b = \frac{d \left( \frac{\bar{\sigma}_s}{15} + \sigma_m \right)}{\left( d - \frac{h_o}{2} \right)} - \frac{\bar{\sigma}_s}{15}$ | 8,6        | MPa             |
| Comparaisons entre $\sigma_m$ et $\sigma_b$        | Oui : Sans armature comprimées                                                                                                          |            |                 |
| Ordonnée de l'ame                                  | $y_1 = \frac{15\sigma_b}{15\sigma_b + \bar{\sigma}_s} d$                                                                                | 45,7<br>5  | cm              |
| Ordonnée de la table de compression                | $y_2 = y_2 - h_o$                                                                                                                       | 25,7<br>5  | cm              |
| Seconde contrainte du béton                        | $\sigma_{b2} = \sigma_b y_2 / y_1$                                                                                                      | 4,85       | MPa             |
| Effort normal dans la section de béton de l'ame    | $N_{b1} = \frac{b y_1 \sigma_b}{2}$                                                                                                     | 4,67       | MN              |
| Effort normal dans la section de béton de la table | $N_{b2} = \frac{(b-b_o) y_2 \sigma_{b2}}{2}$                                                                                            | 1,23       | MN              |
| Section correspondant dans l'ame                   | $A_{s1} = \frac{N_{b1}}{\sigma_s}$                                                                                                      | 216,<br>88 | cm <sup>2</sup> |
| Moment correspondante dans l'ame                   | $M_{s1} = N_{b1} \left( d - \frac{y_1}{3} \right)$                                                                                      | 4,99       | MN.m            |

|                                     |                                                                  |        |                 |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------|-----------------|
| Section correspondant dans la table | $A_{s2} = \frac{N_{b2}}{\sigma_s}$                               | 57,11  | cm <sup>2</sup> |
| Moment correspondante dans la table | $M_{s2} = N_{b2} \left( d - h_o - \frac{y_1}{3} \right)$         | 1,07   | MN.m            |
| Section résultante                  | $A_{s0} = A_{s1} - A_{s2}$                                       | 159,76 | cm <sup>2</sup> |
| Moment résultant                    | $M_{s0} = M_{s1} - M_{s2}$                                       | 3,92   | MN.m            |
| Section d'acier théorique           | $A_{Ser} = \frac{A_{s0} \times M_{ser}}{M_{s0}}$                 | 145,70 | cm <sup>2</sup> |
| Section minimal Amin                | Amin                                                             | 6,73   | cm <sup>2</sup> |
| choix :                             | 16 HA 40 équilibrant une section totale de 201,06cm <sup>2</sup> |        |                 |

### Armature d'effort tranchant

Le calcul est mené à l'ELU. Seule l'âme reprend l'effort tranchant étant donné que les charges roulantes se déplacent sur le pont, espacement constant est conservé le long de la poutre.

| Données et hypothèses                          |       |      |        |
|------------------------------------------------|-------|------|--------|
| Hauteur de la poutre                           | h     | 130  | cm     |
| base de la poutre                              | bo    | 40   | cm     |
| Effort tranchant maximal à l'ELU               | Vumax | 0,66 | MN     |
| cas de fissuration                             |       | FP   |        |
| Reprise de bétonnage non spécialement traité?  |       | NON  |        |
| Longueur de la travée                          | L     | 18   | m      |
| Distance à laquelle l'effort tranchant est nul | Lo    | 9    | m      |
| limite d'élasticité des armatures              | fe    | 400  | Mpa    |
| Résistance à la compression du béton           | fc28  | 30   | Mpa    |
| diamètre des armatures transversales           | Øt    | 8    | mm     |
| Nombre de barres dans un cours d'armatures     | n=6   |      |        |
| Angle d'inclinaison des armatures d'ame        | α     | 90   | dégrés |

| Calcul                            |                                                            |      |     |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------|------|-----|
| Résistance à la traction du béton | $f_{t28} = 0,6 + 0,06f_{c28}$                              | 2,4  | MPa |
| Hauteur utile de la poutre        | d = 0,9h                                                   | 117  | cm  |
| Contrainte tangentielle ultime    | $\tau_u = \frac{Vu}{b0d}$                                  | 1,41 | MPa |
| Contrainte tangentielle limite    | $\tau_{ul} = \min \{0,15 \frac{f_{c28}}{\gamma_b}; 4MPa\}$ | 3,91 | MPa |
| Vérification                      | OK vérifier                                                |      |     |

### 6. Dimensionnement des entretoises

Les entretoises, implantées en about de travée, sont dimensionnées pour reprendre, d'une part, les efforts induits par les vérins lors des opérations de remplacement des appareils d'appui, et d'autre part, l'action ponctuelle d'une roue isolée de type Br. Leur liaison avec les poutres principales est modélisée en semi-encastrement. Conformément aux recommandations de CHARRON (1986), après détermination du moment isostatique maximal  $M_0$ , une redistribution interne est adoptée en retenant  $0,8 M_0$  en travée et  $0,5 M_0$  sur appui.

#### 2.6.1 Évaluation des sollicitations

- Poids propre :  $g_1 = \omega_b \cdot S$  avec  $\omega_b$  désigne le poids volumique du béton armé et  $S$  la section de l'entretoise.

Numériquement :  $g_1 = 25 \times 0,90 \times 0,40 = 9 \text{ kN/m}$ .

- Dalle d'about (charge uniformément répartie) :  $g_2 = \frac{g_h l_x}{4}$ , avec  $g_h$  la charge permanente surfacique portée par la dalle (déterminée précédemment) et  $l_x$  le petit côté du panneau.

Ainsi :  $g_2 = 8,65 \times 2,16 \approx 4,67 \text{ kN/m}$ .

Sous l'action des charges permanentes uniformes  $g_1 + g_2$ , pour une portée  $l = 2,16 \text{ m}$  :

Moment en travée :  $M_G = \frac{(g_1 + g_2)l^2}{8} = 7,97 \text{ kN.m}$  ;

Effort tranchant aux appuis :  $V_G = \frac{(g_1 + g_2)l}{2} = 14,76 \text{ kN}$ .

- Roue isolée Br = 100 kN :

Moment en travée :  $M_{Q1} = \frac{\delta Br l}{4} = 79,38 \text{ kN.m}$  ;

Effort tranchant maximal :  $V_{Q1} = \frac{\delta Br}{2} = 73,50 \text{ kN}$ .

- Réaction du vérin (trafic réduit, guide PP 73) :

$R_v = G + 0,25Q$  avec  $G = 199,14 \text{ kN}$  et  $Q = 346,68 + 20,25 \text{ kN}$ , d'où  $R_v = 290,87 \text{ kN}$ .

Moment équivalent :  $M_{Q2} = \frac{R_v l}{4} = 72,71 \text{ kN.m}$  ;

Effort tranchant :  $V_{Q2} = \frac{R_v}{2} = 145,43 \text{ kN}$ .

- Combinaisons de calcul (deux cas d'action) :

Cas 1 : Poids propre et la roue Br

Moment isostatique à l'ELS :  $M_{ser1} = M_G + 1,2M_{Q1} = 103,22 \text{ kN.m}$  ;

Moment de calcul en travée :  $M_{t1} = 0,80M_{ser1} = 82,58 \text{ kN.m}$  ;

Moment de calcul sur appui :  $M_{a1} = -0,50M_{ser1} = -51,61 \text{ kN.m}$  ;

Effort tranchant de calcul :  $V_{U1} = 1,35V_G + 1,605V_{Q1} = 137,89 \text{ kN}$ .

Cas 2 : Poids propre et les effets du vérin

Moment isostatique à l'ELS :  $M_{ser2} = M_G - M_{Q2} = -64,74 \text{ kN.m}$  ;

Moment de calcul en travée :  $M_{t2} = 0,80M_{ser2} = -51,79 \text{ kN}\cdot\text{m}$  ;

Moment de calcul sur appui :  $M_{a2} = -0,50M_{ser2} = 32,37 \text{ kN}\cdot\text{m}$  ;

Effort tranchant de calcul :  $V_{U2} = 1,35V_G - 1,50V_{Q2} = -198,21 \text{ kN}$ .

| Désignation | $M_{ser_{min}}$ (kN.m) | $M_{ser_{max}}$ (kN.m) | $V_{u_{min}}$ (kN) | $V_{u_{max}}$ (kN) |
|-------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| Travée      | -51,79                 | 82,58                  |                    |                    |
| Appuis      | -51,61                 | 32,27                  | -198,21            | 137,89             |

Récapitulatif des cas de charges sur l'entretoise

## 2.6.2 Calcul des armatures

| Désignation | Section d'acier (cm <sup>2</sup> ) |                  | choix            |                  | Effort tranchant | Armatures d montage |
|-------------|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
|             | Acier supérieurs                   | Acier inférieurs | Acier supérieurs | Acier inférieurs |                  |                     |
| Travée      | 8,19                               | 5,13             | 3 HA 25          | 6 HA 12          | Cadre            | 6 HA 8              |
| Appuis      | 3,16                               | 5,13             | 3 HA 25          | 6 HA 12          | HA8+ étrier HA8  |                     |

## 2.6.3 Dimensionnement des éléments de la pile

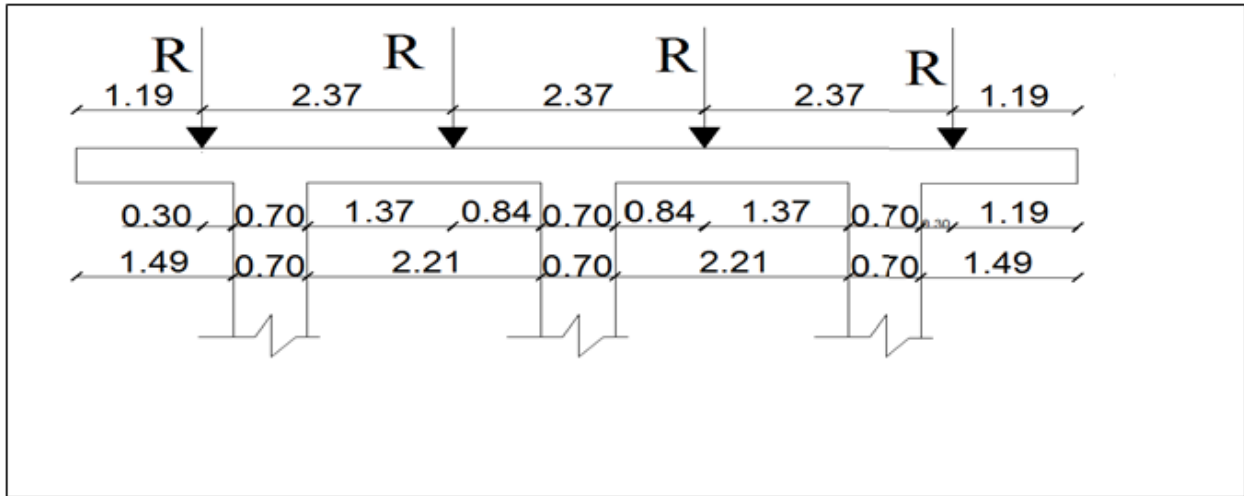
### 2.6.3.1 Etude du chevêtre

Le chevêtre est calculé sous l'hypothèse d'un encastrement dans la colonne. Il a une section de 0,80m × 1,20m et est calculé en flexion et torsion (SETRA, 1974) :

- ✓ En flexion les deux travées sont chargées, il en résulte que la résultante des charges du tablier est centrée sur l'axe du chevêtre ;
- ✓ En flexion+ torsion si une seule travée est chargée : il en résulte un moment de torsion dû à l'excentrement des charges venant du tablier

### 2.6.3.2 Les deux travées chargées

Le calcul du chevêtre se fait en flexion suivant le modèle représenté par la figure 23, où R représentent les charges transmises par les bossages.



#### ❖ Partie en encorbellement

Sollicitations dues aux charges permanentes

Outre leur poids propre, les chevêtres supportent les charges provenant du tablier :

Poids propre :  $\omega \times S = 25 \times 0,80 \times 1,20 = 24 \text{ kN/ml}$

$$M_{G1} = -g1 \frac{l^2}{2} = -24x \frac{1,49^2}{2} = -26,64 \text{ kn.m} ; V_{G1} = g1 \times l = 35,76 \text{ kN}$$

Poids propre du tablier : il provient des poutres  $R_G = 2 \times 199,14 = 398,28 \text{ kN}$

$M_{G2} = -R_G a$  avec  $a = 0,3 \text{ m}$ , d'ou  $M_{G2} = -119,48 \text{ kN.m}$  et  $V_{G2} = R_G = 398,28 \text{ kN}$

Sollicitation dues aux charges permanentes :

• Moment fléchissant :  $MG = MG1 + MG2 = -146,12 \text{ kN.m}$  ;

• Effort tranchant :  $VG = VG1 + VG2 = 434,04 \text{ kN.m}$ .

Sollicitations dues aux charges d'exploitation

Il s'agit des charges de la chaussée du trottoir. On suppose les efforts du tablier équitablement répartis sur les cinq bossages

Evaluation des efforts correspondant à chaque système de charges :

#### ❖ Charges de trottoirs :

Les deux travées du pont sont supposées chargées

$$\text{On a } R_T = \frac{1,5 \times 2 \times 1,5 \times 2 \times 18}{2 \times 4} = 20,25 \text{ kN}$$

- Moment fléchissant :  $MT = -2RTa = -12,15kN.m;$
- Effort tranchant :  $VT = 2RT = 40,5kN$

Charges du système A :

Les deux travées du pont sont supposées chargées

Les deux travées du pont sont supposées chargées. On a :

$$A(l) = 230 + \frac{36000}{1+12} = 9,8kN/m^2 \quad R_T \frac{9,8 \times 7 \times 2 \times 18}{2 \times 4} = 308,7 kN$$

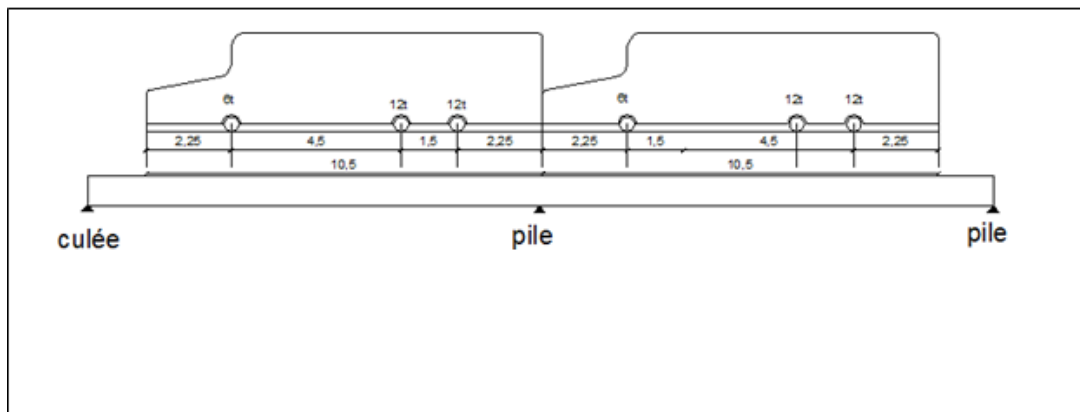
Charge du système Bt:

Les essieux des deux tandems sont placés de part et d'autre de la pile.

$$R = \frac{2 \times 230}{4} \left( 1 - \frac{1,35}{2 \times 18} \right) = 154kN. \text{ En tenant compte du coefficient de majoration dynamique } \delta_{Bt} = 1,47 \text{ et du coefficient } b_t = 1, \text{ il en résulte } R_{Bt} = 226,38kN.$$

Charge du système Bc

La réaction maximale sur pile est obtenue en disposant un camion de part et d'autre de la pile.



$$R = \frac{1}{4} \times 120 \left( 9 - \frac{42}{18} \right) = 200kN. \text{ En tenant compte du coefficient de majoration dynamique } \delta_{Bc} = 1,47 \text{ et du coefficient } b_c = 1,10, \text{ la réaction maximale vaut } R_{Bc} = 323,4kN$$

Charge du système Mc120

La réaction maximale sur pile est obtenue en disposant un véhicule centré sur la pile.

$$R = \frac{1}{4} \times 1100 \left( 1 - \frac{6,10}{4 \times 18} \right) = 251,70 kN. \text{ En tenant compte du coefficient de majoration dynamique } \delta_{Mc120} = 1,2, R_{Mc120} = 302,04kN.$$

Sollicitation de calcul

On remarque les efforts venant du système Bc sont prépondérants. A ces efforts doivent être

Ajoutés les efforts venant des trottoirs :  $R_Q = R_{Bc} + R_T = 343,65kN$ . On a donc :  $M_Q = - R_Q a$  avec  $a = 0,3m$  d'où  $M_Q = -103,09kN.m$  et  $V_Q = R_Q = 343,65kN$

$$D'où M_{Ser} = M_G + 1,2M_Q = 269,82kN.m \text{ et } V_U = 1,35V_G + 1,60V_Q = 1070,69kN$$

### 2.6.3.3 Une seule travée chargée

Lorsqu'une seule travée de pont est chargée, la résultante des efforts transmis par les bossages au chevet n'est plus centrée. Il en résulte, en plus du moment fléchissant  $M$  un moment de torsion  $MT$  (SETRA, 1974). L'excentrement des charges de chaussée vaut alors  $d = 32,5\text{cm}$ , les charges permanentes ne créant pas de torsion.

#### ❖ Evaluation des sollicitations

D'après les résultats obtenus plus haut, le moment dû aux charges permanentes vaut :  $= 102,61\text{ kN.m}$ . D'après ceux obtenus au niveau des sollicitations sur la chaussée, lorsqu'une seule travée est chargée la réaction d'appui est maximale sous les charges de type  $Mc120$  et vaut  $RMc120 = 912,99\text{ kN}$  soit  $R = 228,24\text{ kN}$  par bossage. Le moment de flexion dû aux charges d'exploitation en travée vaut :

$$M_Q = \frac{2Ra^2b^2}{L^3} = \frac{2 \times 228,24 \times 1,37^2 \times 0,84^2}{2,21^3} = 56\text{ kN.m}$$

Le moment de torsion maximal vaut quant à lui :

$$M_T = R_d \frac{b}{t} = 228,24 \times 0,325 \times \frac{0,84}{2,21} = 28,19\text{ kN.m (SETRA, 1974)}.$$

Le calcul des armatures en flexion se fera à l'ELS en fissuration préjudiciable avec

$M_{ser} = M_G + 1,2M_Q = 169,81\text{ kN.m}$ . Le calcul en torsion se fera à l'état limite ultime avec un moment de torsion ultime  $= 1,605 M_T = 45,24\text{ kN.m}$ .

Calcul des armatures

En flexion :

| $M_{ser}$<br>(KN.m) | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | choix   | $A_{réel}$ (cm <sup>2</sup> ) |
|---------------------|--------------------------|---------|-------------------------------|
| 169,81              | 12,56                    | 5 HA 20 | 15,71                         |

### 2.6.3.4 Etude des colonnes

Les colonnes seront dimensionnées en compression. Ils supportent outre leur poids propre, les charges transmises par le chevet. La colonne la plus sollicitée est la colonne centrale. Sa hauteur est  $h_c = 5,25\text{m}$  et son diamètre  $\varnothing = 0,70\text{ m}$ .

#### ❖ Evaluation des sollicitations

Les charges reprises par les colonnes centrales sont les suivantes :

- Charges permanente

$$\text{Poids propre fut : } G_1 = \pi \omega_b h \frac{\phi^2}{4} = \pi \times 25 \times 5,25 \times \frac{0,70^2}{4} = 50,51 \text{ kN};$$

$$\text{Poids travée chevêtre : } G_2 = \omega_b S l = 25 \times 12 \times 0,8 \times 2,21 = 53,04 \text{ kN};$$

Charges permanente venant du tablier :

$$G_3 = \frac{R_G a^2 (l+2b)}{l^3} = 398,28 \frac{98,28 \times 1,37^2 (2,21+2 \times 0,84)}{2,21^3} = 937,0 \text{ kN}$$

$$\text{Soit au total } G = \sum G_i = 1040,63 \text{ kN}$$

Charges d'exploitation

Elles sont transmises par le chevêtre et proviennent du tablier :

$$Q = R_Q + 2 \frac{R_Q a^2 (l+2b)}{l^3} \text{ (COURBON et THEILLOUT, 2001)}$$

$$Q = 343,65 + 2 \frac{343,65 \times 1,37^2 (2,21+2 \times 0,84)}{2,21^3} = 576,10 \text{ kN}$$

Charge à l'ELU

Le calcul sera mené en compression centré aux ELU avec pour sollicitation ultime

$$N_u = 1,35G + 1,605Q = 1,35 \times 1040,63 + 1,605 \times 576,10 = 2329,49 \text{ kN}$$

Calcul des armatures

Le calcul des armatures à l'ELU avec  $N_u = 2329,49 \text{ kN}$  conduit à des sections d'armatures minimales. Il faudra donc se référer aux dispositions constructives du dossier pilote PP 73.

Armatures verticales

$$A_v = \max(20 \text{ cm}^2; 0,2\%B) \text{ Avec } B = \text{section de la colonne d'ou}$$

$$A_v = \max(20; 7,7) = 20 \text{ cm}^2$$

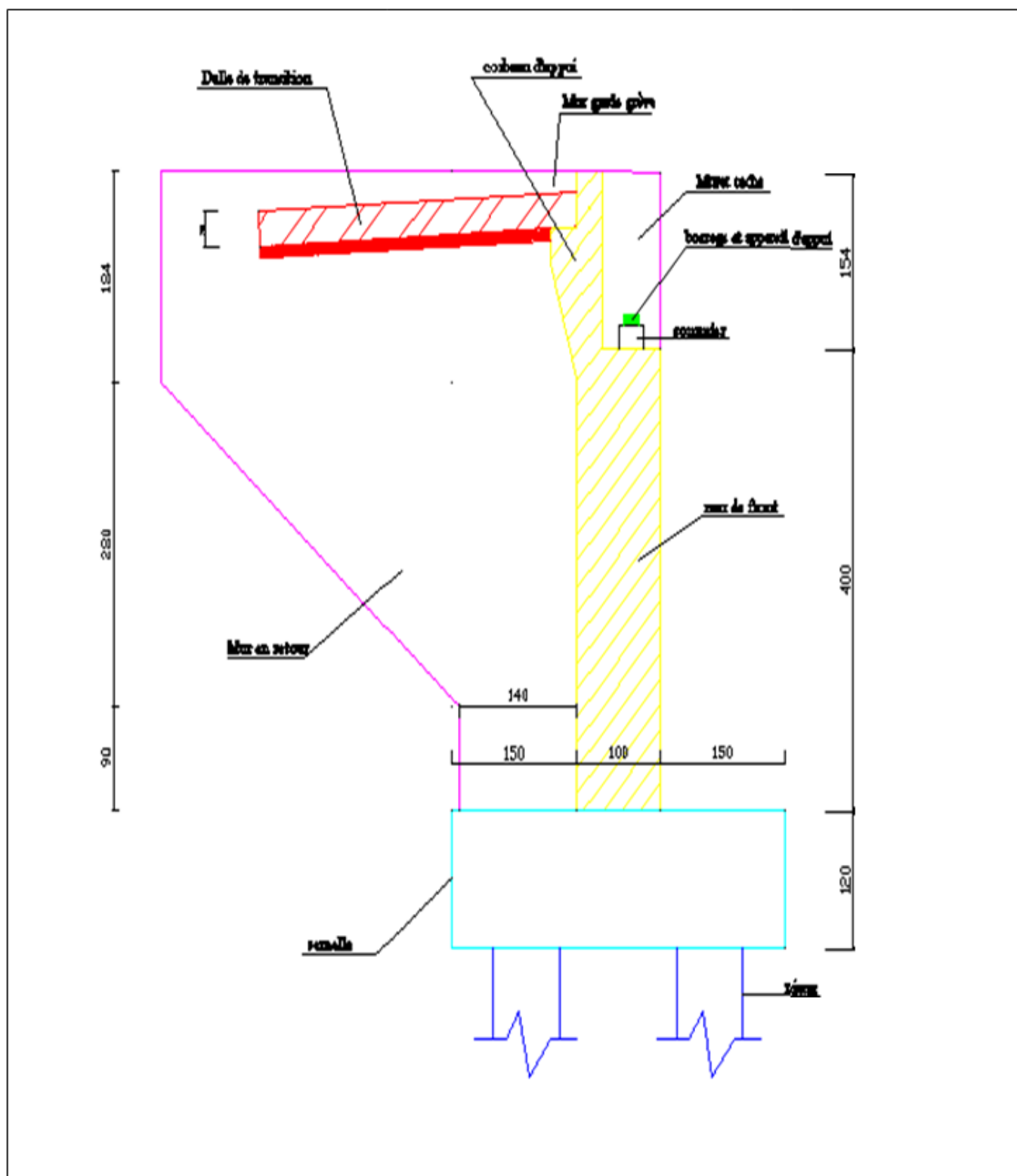
Choisissons donc 10 HA 16.

Armatures horizontales

$$A_h = 0,05\%B = 1,92 \text{ cm}^2. \text{ Le choix est porté sur des cerces HA 12 tous les 40cm.}$$

### 3. Dimensionnement des éléments de la culée

#### 3.1 Géométrie



### Bilans des actions s'exerçant sur la culée

- Charges permanentes

| Désignation                         | Symbole                                          | Intensité<br>(I)                            | Bras de<br>Levier (II)           | Moment<br>(I) x (II) | Pondé<br>ration<br>ELU | Pondér<br>ation<br>ELS |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Poids semelle                       | $P_s$                                            | $\omega_b E_d L_s$                          | $\frac{L_s}{2}$                  | (I) x (II)           | 1,35                   | 1                      |
| Poids propre<br>rideau              | $P_r$                                            | $\omega_b E_r H_r$                          | $L_p + \frac{E_r}{2}$            | (I) x (II)           | 1,35                   | 1                      |
| Poids du garde-<br>grève            | $P_g$                                            | $\omega_b E_{gg} H_{gg}$                    | $L_p + E_r - \frac{E_{gg}}{2}$   | (I) x (II)           | 1,35                   | 1                      |
| Poids dalle<br>transition           | $P_d$                                            | $\omega_b E_d L_d / 2$                      | $L_p + E_r + \frac{L_{corb}}{2}$ | (I) x (II)           | 1,35                   | 1                      |
| Poids des terres<br>sur talon       | $P_t$                                            | $\gamma L_t H_r$                            | $L_s - \frac{L_t}{2}$            | (I) x (II)           | 1,35                   | 1                      |
| Poids de terres<br>sur patin        | Négligé (ce qui va dans le sens de la sécurité)  |                                             |                                  |                      |                        |                        |
| Poids du tablier                    | $Tv_g$                                           | $\frac{gl}{2L}$                             | $L_p + l_a$                      | (I) x (II)           | 1,35                   | 1,5                    |
| Poussée des<br>terres sur talon     | $F_t$                                            | $\frac{1}{2} K_a \gamma H_t^2 \cos \varphi$ | $\frac{H_t}{3}$                  | (I) x (II)           | 1,35                   | 1                      |
| Poussées du au<br>poids de la dalle | $F_d$                                            | $K_a \omega_b E_d H_t \cos \varphi$         | $\frac{H_t}{2}$                  | (I) x (II)           | 1,35                   | 1                      |
| Butée des terres<br>sur le talon    | Négligé ( ce qui va dans le sens de la sécurité) |                                             |                                  |                      |                        |                        |

| Désignation                | symbole | Intensité<br>(kN) | Bras de<br>levier<br>(m) | Moment<br>(KN.m) | Intensité<br>ELU (kN) | Intensité<br>ELS (kN) | Moment<br>ELU<br>(KN.m) | Moment<br>ELS<br>(KN.m) |
|----------------------------|---------|-------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Poids semelle              | $P_s$   | 120               | 2                        | 240              | 162                   | 120                   | 324                     | 240                     |
| Poids propre rideau        | $P_r$   | 105               | 2                        | 210              | 141,75                | 105                   | 283,5                   | 210                     |
| Poids du garde-grève       | $P_g$   | 8,75              | 2,49                     | 21,79            | 11,81                 | 8,75                  | 29,41                   | 21,7875                 |
| Poids dalle transition     | $P_d$   | 11,25             | 2,5                      | 28,13            | 15,19                 | 11,25                 | 37,97                   | 28,125                  |
| Poids des terres sur talon | $P_t$   | 174,55            | 3,25                     | 567,29           | 235,64                | 174,55                | 765,84                  | 567,29                  |
| Poids du tablier           | $Tv_g$  | 88,506            | 1,8                      | 159,31           | 119,48                | 132,76                | 215,07                  | 238,97                  |
| Poussée des terres sur     | $F_t$   | 157,41            | 2,25                     | 354,17           | 212,50                | 157,41                | 478,13                  | 354,17                  |

Action et sollicitations sur la culée dues aux charges permanentes

➤ Charges d'exploitations

| Désignation                   | Symbole   | Intensité<br>(I)         | Bras de<br>Levier<br>(II) | Moment<br>(I) x (II) | Pondération<br>ELU | Pondération<br>ELS |
|-------------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Surcharges sur remblai        | $P_q$     | $qL_t$                   | $L_s - \frac{L_t}{2}$     | (I) x (II)           | 1,605              | 1,20               |
| Venant de la chaussée (Mc120) | $TV_{q1}$ | $\frac{Q_{Mc120}}{L}$    | $L_p + l_a$               | (I) x (II)           | 1                  | 1                  |
| Venant du trottoir            | $TV_{q2}$ | $\frac{q_t l}{2L}$       | $L_p + l_a$               | (I) x (II)           | 1,605              | 1,20               |
| Poussée surcharges remblai    | $F_q$     | $k_a q H_t \cos \varphi$ | $\frac{H_t}{2}$           | (I) x (II)           | 1,605              | 1,20               |
| Force de freinage             | $Th_q$    | (camion $B_c$ )/2L       | $H_t$                     | (I) x (II)           | 1,605              | 1,20               |

| Désignation                   | symbole   | Intensité<br>( kN) | Bras de<br>levier<br>(m) | Moment<br>(KN.m) | Intensité<br>ELU (kN) | Intensité<br>ELS (kN) | Moment<br>ELU<br>(KN.m) | Moment<br>ELS<br>(KN.m) |
|-------------------------------|-----------|--------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Surcharges sur remblai        | $P_q$     | 15                 | 3,25                     | 48,75            | 24,075                | 18                    | 78,24                   | 58,5                    |
| Venant de la chaussée (Mc120) | $TV_{q1}$ | 115,78             | 1,8                      | 208,40           | 115,78                | 115,78                | 208,40                  | 208,40                  |
| Venant du trottoir            | $TV_{q2}$ | 4,5                | 1,8                      | 8,1              | 7,22                  | 5,4                   | 13,00                   | 9,72                    |
| Poussée surcharges remblai    | $F_q$     | 14,82              | 3,37                     | 49,94            | 23,79                 | 17,78                 | 80,16                   | 59,93                   |
| Force de freinage             | $Th_q$    | 16,66              | 5,34                     | 88,96            | 26,74                 | 19,99                 | 142,79                  | 106,76                  |

Actions et sollicitations sur la culée dues aux charges d'exploitation

### 3.2 Vérification de la stabilité externe de la culée

La vérification de la stabilité externe de la culée se fait conformément à l'article B.3 du Fascicule 62, Titre V.

#### ➤ Détermination de la contrainte de rupture

Pression limite équivalente  $p_{le}^*$

Les essais pressiométriques ont été exécutés à l'aide du pressiomètre MENARD de type GA équipé de sonde BX de 60mm de diamètre. L'examen de caractéristiques ont permis de retenir 7,5 bars  $< p_{le}^* < 21$  bars nous avons donc pris la moyenne ce qui nous a donnée  $p_{le}^* = 14,125$  bars

Contrainte de rupture du sol  $q'_u$

La contrainte limite du sol est donnée par :  $q'_u = q'_o + k_p p_{le}^*$  (Fascicule 62, Titre V, Annexe B.1.), avec :

$$q'_o = \gamma_s D = 20 \times 10^{-3} \times 1,20 = 0,02 \text{ MPa};$$

$$k_p = 0,80 \left( 1 + 0,35 \left( 0,6 + 0,4 \frac{B_s}{L_s} \right) \frac{D_s}{B_s} \right) \text{ Avec } D_e = \frac{1}{p_{le}^*} \int_0^D p_{le}^*(z) dz = 0,32m$$

$$k_p = 0,80 \left( 1 + 0,35 \left( 0,6 + 0,4 \frac{4}{10,5} \right) \frac{0,32}{4} \right) = 0,82$$

La contrainte de rupture vaut donc :  $q'_u = 0,024 \ 0,82 \times 1,412 = 1,1818 \text{ MPa}$

➤ Vérification de l'état limite ultime de mobilisation du sol support (capacité portante)  
La vérification se fait quand l'ouvrage est en service. Le calcul est mené à l'ELU.

Il s'agit de vérifier  $q'_{ref} \leq q'_{lim} = \frac{1}{\gamma_q} (q'_u - q'_o) i_{\delta\beta} + q'_o$  avec :

$$q'_{ref} = \frac{\sigma_{min} + 3\sigma_{max}}{4} \text{ avec } \sigma_{min} = \frac{R_v}{B_s} \left( 1 - 6 \frac{|e|}{B_s} \right); \sigma_{max} = \frac{R_v}{B_s} \left( 1 + 6 \frac{|e|}{B_s} \right); \text{ et } e = \frac{L_s}{2} - \frac{\sum M/0}{R_v};$$

$$i_{\delta\beta} = \left( 1 - \frac{\delta}{90} \right)^2 \text{ ou } \delta \text{ est l'inclinaison de la résultante par rapport à la verticale}$$

$\gamma_q = 2$  à l'ELU (Fascicule 62, Titre V, Article B.3.1)

Les résultats sont consignés ci-après :

| Poinçonnement                                     |                   |            |      |
|---------------------------------------------------|-------------------|------------|------|
| Total des moments (KN.m)                          | $\Sigma M/0$      | 1194,75    | KN.m |
| Composante verticale de la résultante             | RV                | 832,94     | KN   |
| Composante horizontale de la résultante           | RH                | 273,53     | KN   |
| Excentricité                                      | e                 | 0,27       | m    |
| Contrainte minimale                               | $\sigma_{min}$    | 0,10228675 | Mpa  |
| Contrainte maximale                               | $\sigma_{max}$    | 0,24345775 | Mpa  |
| Contrainte de référence                           | $q'_{ref}$        | 0,208165   | Mpa  |
| Inclinaison résultante par rapport à la verticale | $\delta$          | 21,58      | °    |
| Coefficient de minoration due à l'inclinaison     | $i_{\delta\beta}$ | 0,57793783 |      |
| Contrainte limite                                 | $q'_{lim}$        | 0,35       | MPa  |
| Conclusion                                        | vérifier          |            |      |

### Vérification de l'état limite ultime de renversement

La vérification au renversement se fait en phase de construction, c'est à dire en l'absence de tablier.

Il s'agit de vérifier :  $k_1 = \frac{\sum \text{Moment stabilisateurs}}{\sum \text{Moments renversant}} \geq 1$  (Fascicule 62, Titre V, Article B. 3.2).

Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

| Stabilité au renversement |              |         |      |
|---------------------------|--------------|---------|------|
| Moment stabilisateur      | $\Sigma M/0$ | 1911,69 | KN.m |
| Moment renversants        | $\Sigma M/0$ | 747,84  | KN.m |
| Coefficient de sécurité   | K1           | 2,56    |      |
| Conclusion                | Vérifier     |         |      |

### Vérification de l'état limite ultime de glissement

La vérification au glissement se fait lui aussi en phase de construction.

Il s'agit de vérifier :  $R_H \leq R = \frac{R_v \tan \varphi'}{\gamma_{g1}} + \frac{C' A'}{\gamma_{g2}}$

$R_H$  et  $R_v$  sont les composantes horizontales et verticales de la résultante ;

$C'$  la cohésion du sol,  $C' = 30 \text{ kPa}$  ;

$\varphi'$  l'angle de frottement interne du sol,  $\varphi' = 35^\circ$

$A'$  est la surface de semelle comprimées. Puisque notre semelle est entièrement comprimée ;

$A' = B_s L_s$  ;

$\gamma_{g1}$  et  $\gamma_{g2}$  sont des coefficients valant respectivement 1,2 et 1,5 (Fascicule 62, Titre V, Article B.3.4).

Les résultats sont consignés ci-après.

| Stabilité au glissement            |          |            |    |
|------------------------------------|----------|------------|----|
| Résultante des forces verticales   | $R_v$    | 654,58     | KN |
| Résultante des forces horizontales | $R_H$    | 196,38     | KN |
| Forces stabilisatrices             | R        | 354,458033 | KN |
| Conclusion                         | Vérifier |            |    |

### 05. Justification de la stabilité interne de la culée : calcul des armatures

#### ➤ Calcul du mur de front

- Evaluation des sollicitations

Le calcul des armatures du mur de front se fait en l'absence du tablier. Outre les efforts de compression provenant de son poids propre et de celui des murets (qui seront négligées), le mur de front supporte un moment fléchissant résultant des poussées de terre et des surcharges sur remblai d'accès. Il est calculé comme un mur de soutènement en le supposant encastré dans la semelle (ADETS, 2005). Le calcul sera donc mené en flexion composée aux ELS et en fissuration peu préjudiciable. Les sollicitations sont regroupées dans le tableau suivant :

| Désignation                                    | Symbole        | Intensité<br>(kN) | Bras de<br>levier<br>(m) | Moment<br>(KN.m) | Pondération<br>ELS | Moment<br>ELS<br>(KN.m) |
|------------------------------------------------|----------------|-------------------|--------------------------|------------------|--------------------|-------------------------|
| <b>Effort normal</b>                           |                |                   |                          |                  |                    |                         |
| Charges permanentes                            |                |                   |                          |                  |                    |                         |
| Poids propre + poids dalle de transition       | Pr             | 122,5             |                          |                  |                    |                         |
| <b>Moments fléchissants</b>                    |                |                   |                          |                  |                    |                         |
| Charges permanentes                            |                |                   |                          |                  |                    |                         |
| Poussée des terres sur le talon                | F <sub>t</sub> | 157,41            | 2,25                     | 354,1725         | 1                  | 354,1725                |
| Poussée due au poids de la dalle de transition | F <sub>d</sub> | 7,42              | 3,37                     | 25,0054          | 1                  | 25,0054                 |
| Charge d'exploitation                          |                |                   |                          |                  |                    |                         |
| Poussée surcharges sur remblai                 | F <sub>q</sub> | 14,82             | 3,37                     | 49,9434          | 1,2                | 59,93208                |
| Moment de calcul à l'ELS                       | MG             | 439,11            |                          |                  | KN.m/ml            |                         |
| Excentricité                                   | e              | 3,6               |                          |                  | m                  |                         |

Calcul des armatures

Puisque  $e = 3,6\text{m} \geq 1/6 = 0,16$ , nous sommes en section partiellement comprimée.

| Données                                                     |                                                                                                              |       |                 |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------|
| Base                                                        | B                                                                                                            | 100   | cm              |
| Hauteur                                                     | H                                                                                                            | 100   | cm              |
| Hauteur utile acier comprimés                               | D                                                                                                            | 92    | cm              |
| Hauteur utile acier tendus                                  | d'                                                                                                           | 8     | cm              |
| Moment de service                                           | M <sub>ser</sub>                                                                                             | 0,44  | MN.m            |
| Effort normal                                               | N <sub>ser</sub>                                                                                             | 0,12  | MN              |
| Limite d'élasticité des aciers                              |                                                                                                              | 400   | Mpa             |
| Limite de résistance du béton                               |                                                                                                              | 30    | Mpa             |
| Calculs                                                     |                                                                                                              |       |                 |
| Moment par rapport aux aciers tendus                        | $M_{serA} = M_{max} + N_{max}(d - h/2)$                                                                      | 0,49  | MN.m            |
| Excentricité                                                | $e = \frac{M_{ser}}{N_{ser}}$                                                                                | 3,6   | m               |
| Resistance traction du béton                                | $f_{t28} = 0.6 + 0.06f_{c28}$                                                                                | 2,4   | Mpa             |
| Contrainte de calcul du béton                               | $\sigma_{bc} = 0.6f_{c28}$                                                                                   | 18    | Mpa             |
| Contrainte de calcul des aciers                             | $\sigma_s = \min\left(\frac{2}{3}f_e; 110\sqrt{f_{t28}}\right)$                                              | 215,6 | Mpa             |
| Coefficient a                                               | $\alpha_1 = \frac{15 \times \sigma_{bc}}{15 \times \sigma_{bc} + \sigma_s}$                                  | 0,56  |                 |
| Moment résiduel                                             | $M_{RB} = \frac{1}{2} \times \alpha_1 \left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right) b_0 \times d^2 \times \sigma_{bc}$ | 3,45  | MN              |
| Bras de levier                                              | $d \left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right)$                                                                      | 74,95 | cm              |
| Nature                                                      | Sans armatures comprimées                                                                                    |       |                 |
| Section d'armatures Fictif                                  | $A_{ser} = \frac{M_{ser}}{z_b \times \sigma_s}$                                                              | 30,37 | cm <sup>2</sup> |
| Section d'armatures réelles                                 | $A = A_{ser} - \frac{N_{max}}{\sigma_{st}}$                                                                  | 26,85 | cm <sup>2</sup> |
| Section minimale                                            | $A_{min} = 0.23 \frac{f_{t28}}{f_e} b_0 d \times \frac{e - 0.45d}{e - 0.185d}$                               | 11,79 | cm <sup>2</sup> |
| Section théorique d'armature                                | $\max(A; A_{min})$                                                                                           | 26,85 | cm <sup>2</sup> |
| Choix : 6 HA 25/m A <sub>sréel</sub> = 29,45cm <sup>2</sup> |                                                                                                              |       |                 |
| Aciers de répartition : 4 HA 16/m soit 8,04cm <sup>2</sup>  |                                                                                                              |       |                 |

### ➤ Calcul de la dalle de transition

La dalle de transition a la même largeur que l'ouvrage, soit  $L_d = 9,5\text{m}$ . Le calcul est mené conformément aux prescriptions du SETRA dans le guide « Dalles de transition des ponts routes-Technique et réalisation » d'octobre 1984 :

Elle est calculée comme une poutre sur deux appuis reposant d'une part sur le corbeau d'appui et d'autre part sur le remblai (prenant appui sur une largeur de 60cm de remblais) ;

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

Les calculs sont menés aux ELU

Le moment total du aux charges de chaussée maximal à l'abscisse S (théorème de BARRE) et vaut  $M = 480,86\text{KN.m}$ , soit  $M_Q = 45,80\text{KN.m}$  par mètre linéaire de largeur de dalle.

Le moment du aux charges permanentes vaut  $M_G = W_v e_d \frac{l^2}{8}$  ;

Soit :  $M_G = 25 \times 0,3 \times \frac{3^2}{8} = 9,30 \text{ kn/ml}$

On a donc à l'ELU  $M_u = 1,35M_G + 1,6M_Q = 86,06 \text{ kN/ml}$

Le calcul des aciers est résumé ci-après.

| Moment<br>(KN.m)                                               | Section<br>théorique<br>(cm <sup>2</sup> ) | Section<br>minimale<br>(cm <sup>2</sup> ) | Choix     | Section<br>réelle<br>(cm <sup>2</sup> ) | Espacement<br>(cm) |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------|--------------------|
| 86,06                                                          | 9,51                                       | 3,31                                      | 8 HA 14/m | 12,32                                   | 12,5               |
| Armature de répartition $A/4 = 3,11\text{cm}^2$ , donc 4HA10/m |                                            |                                           |           |                                         |                    |

## 4. Etude des appareils d'appuis

Le tablier reposera sur les piles et les culées par l'intermédiaire des appareils d'appuis qui sont conçus pour transmettre à la fois des efforts verticaux et horizontaux et permettre les mouvements de rotation (dus aux charges d'exploitation ou aux déformations imposées) (SETRA, 2007). Il sera mis en place des appareils d'appui en élastomère fretté de type B (frettages intermédiaires). Les calculs sont effectués ici suivant les recommandations du SETRA dans le guide Appareils d'appui en élastomère fretté- Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires d'Octobre 2007.

Sollicitations sur les appareils d'appui

Les appareils d'appuis transmettent aux appuis (pile et culé) les efforts tant bien que horizontaux que verticaux.

- Efforts horizontaux :

Il s'agit ici essentiellement la force de freinage (poids d'un camion  $B_c$ ) que l'on suppose équitablement répartie entre les 4 poutres, d'où  $F_x = \frac{300}{4} = 75 \text{ kN}$ , soit à l'ELU  $F_x = 1,605 \times 75 = 120,375$

- Efforts verticaux :

Il s'agit ici du poids propre de la poutre, des charges de chaussée (système  $B_c$ ) et des charges du trottoir. Les valeurs proviennent du calcul du tablier.

- Charges permanentes :  $G = 340,03 \text{ kN}$
- Charges de chaussée :  $Q_1 = 364,48 \text{ kN}$
- Charges de trottoir :  $Q_2 = 20,25 \text{ kN}$
- Effort verticale minimal à l'ELU :  $P_1 = 1,35G = 459,04 \text{ kN}$
- Effort verticale maximal à l'ELU :  $P_2 = 1,35G + 1,605(Q_1 + Q_2) = 1076,53 \text{ kN}$
- Dimensions en plan

Les dimensions en plan de l'appareil d'appui sont déterminées en limitant la contrainte moyenne dans l'appareil. La contrainte minimale ne doit pas être en deçà de 3 MPa et la contrainte maximale ne doit pas être au-dessus de 20 MPa (SETRA, 2007), soit  $3 \text{ MPa} \leq \sigma_m \leq 20 \text{ MPa}$ .

On a donc  $\frac{P_2}{20 \text{ MPa}} \leq A' \leq \frac{P_1}{3 \text{ MPa}}$  ou  $A'$  est la section nette réelle de l'élastomère.

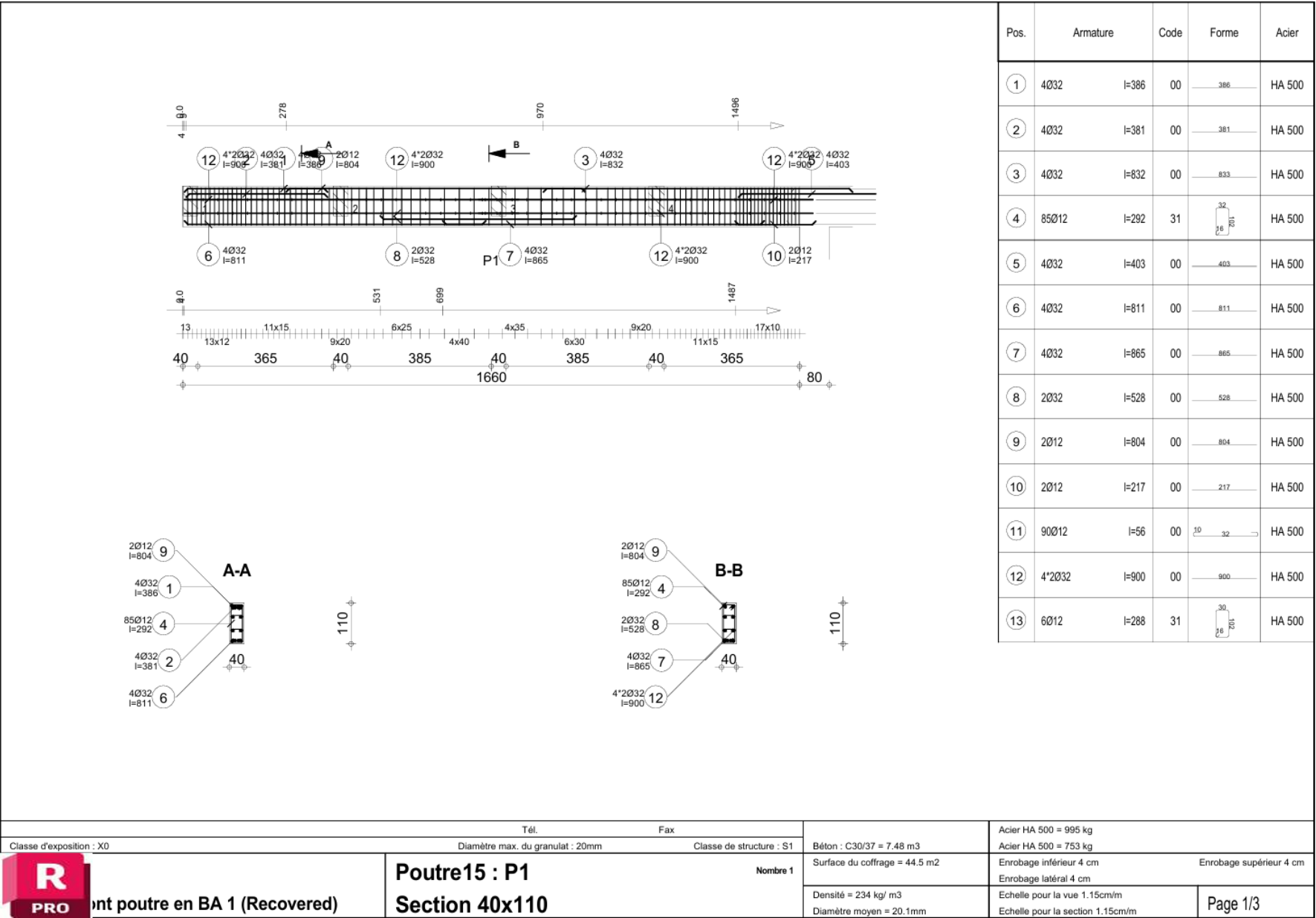
$$\text{Soit } \frac{1076,53 \times 10^4}{20 \times 10^{-3}} = 538,26 \text{ cm}^2 \leq A' \leq \frac{459,04 \times 10^4}{3 \times 10^{-3}} = 1530 \text{ cm}^2$$

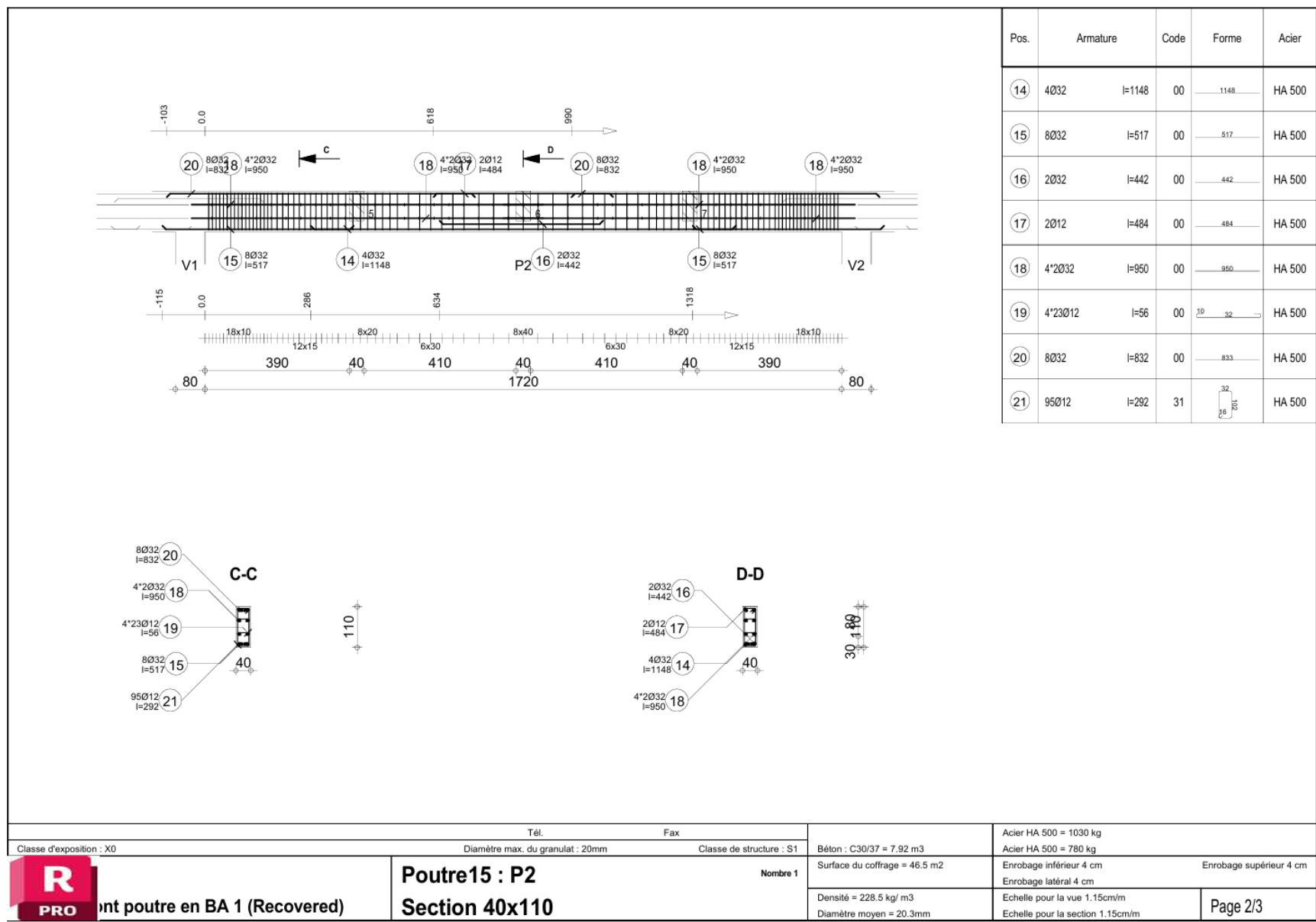
En choisissant des feuilles de dimensions planes  $a = 25 \text{ cm}$  et  $b = 30 \text{ cm}$  et en supposant un enrobage de  $e = 5 \text{ mm}$  sur le pourtour des feuilles d'élastomère.

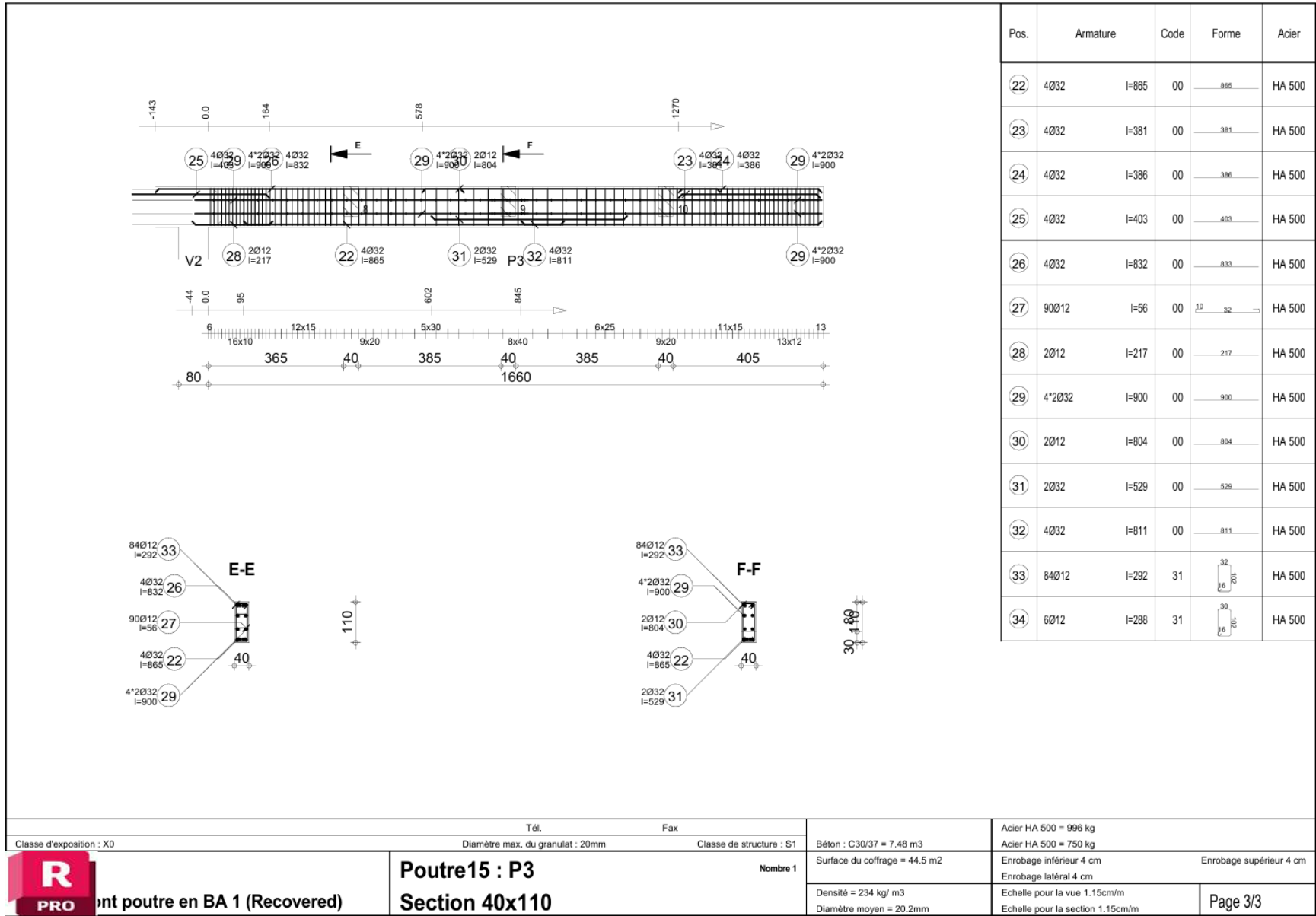
$A' = (25 - 2 \times 0,5) \times (30 - 2 \times 0,5) = 696 \text{ cm}^2$ , qui est bien dans l'intervalle indiqué.

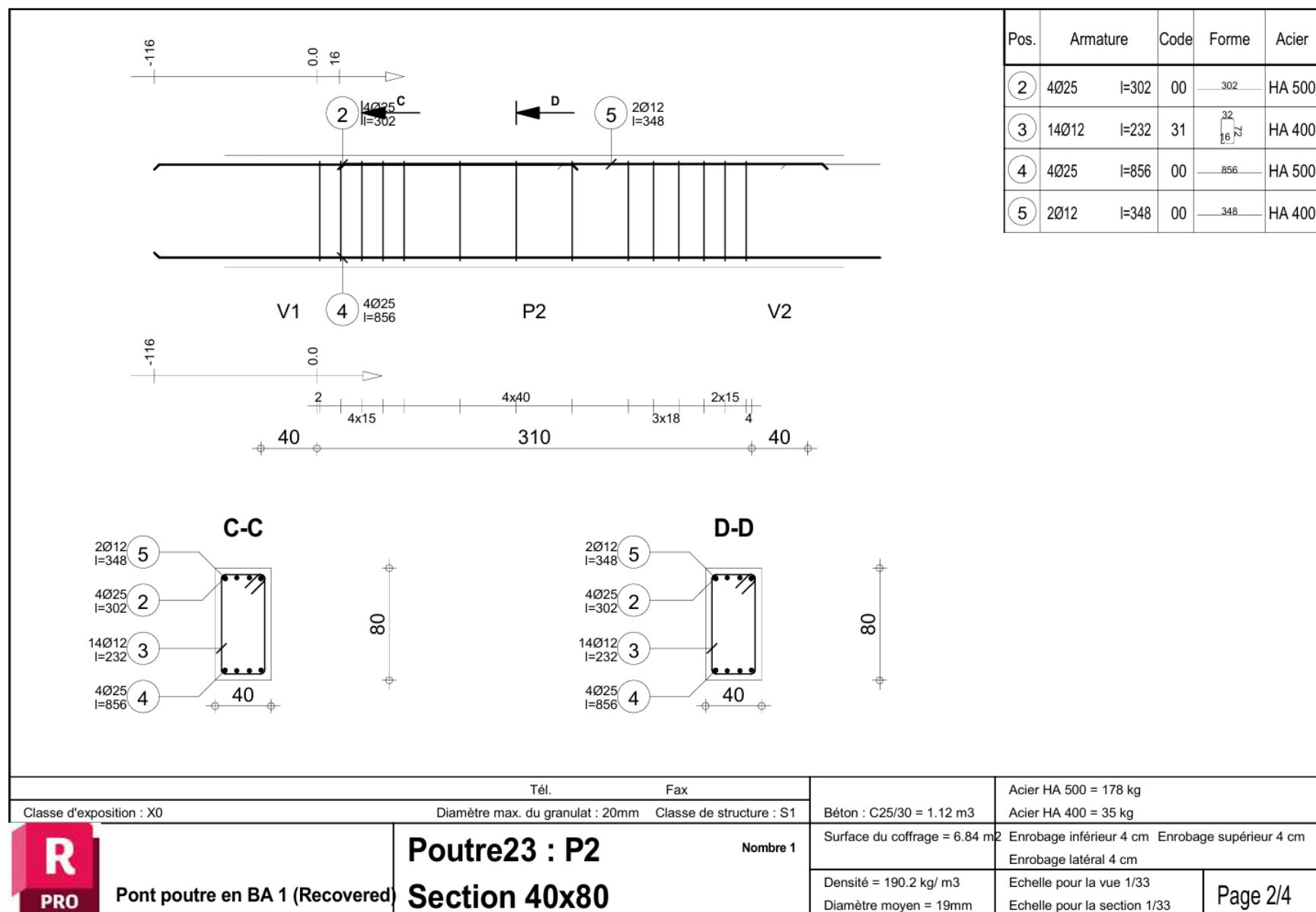
- Hauteur totale des couches d'élastomère

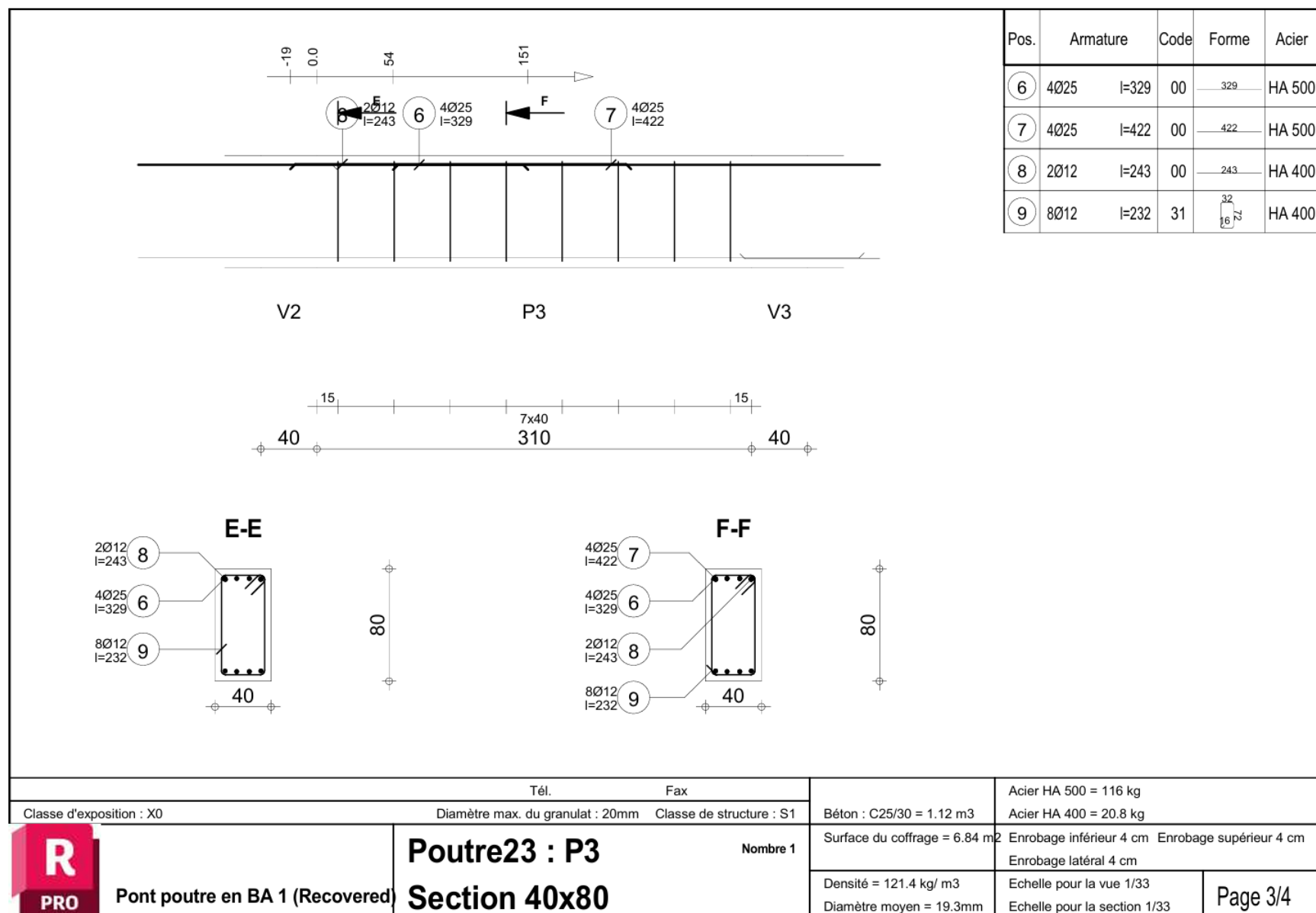
Si  $T$  est la hauteur total des couches d'élastomère, il est d'usage d'avoir  $a/10 \leq T \leq a/5$ , soit  $25 \text{ mm} \leq T \leq 50 \text{ mm}$ . En choisissant 4 feuilles intermédiaires de 8mm, les feuilles externes auront 4mm, pour une hauteur total  $T = 4 \times 8 + 2 \times 4 = 40 \text{ mm}$ .

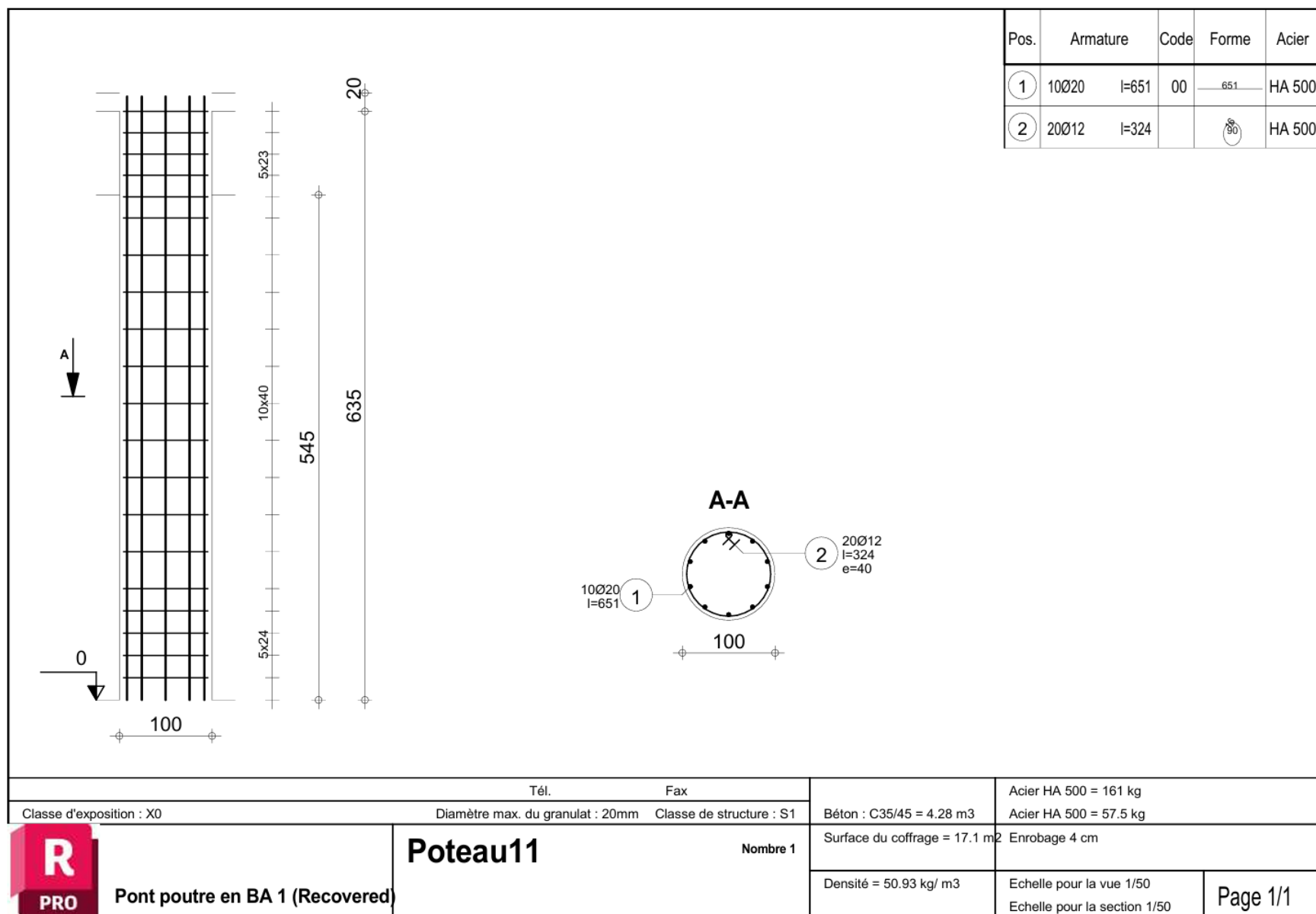


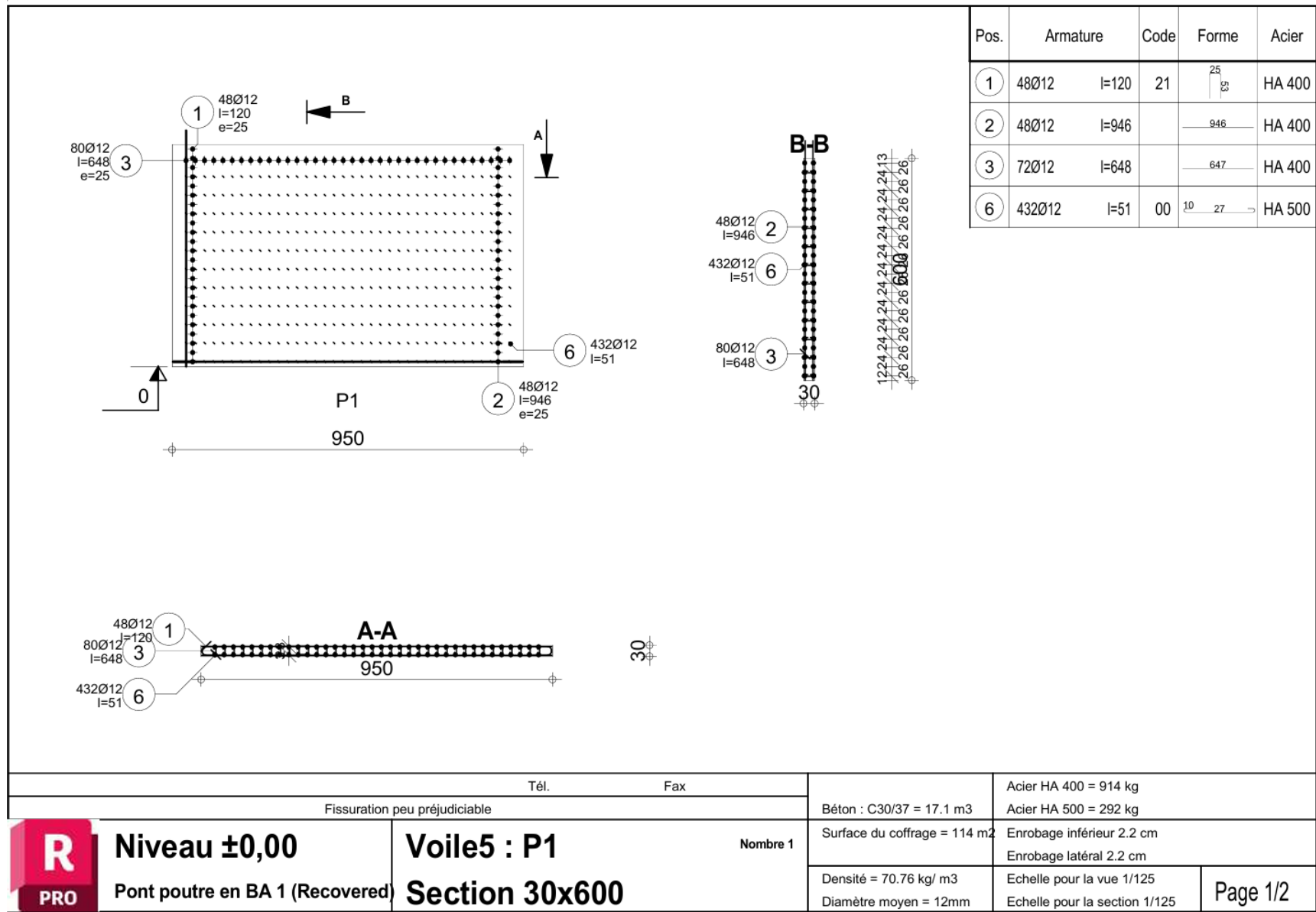


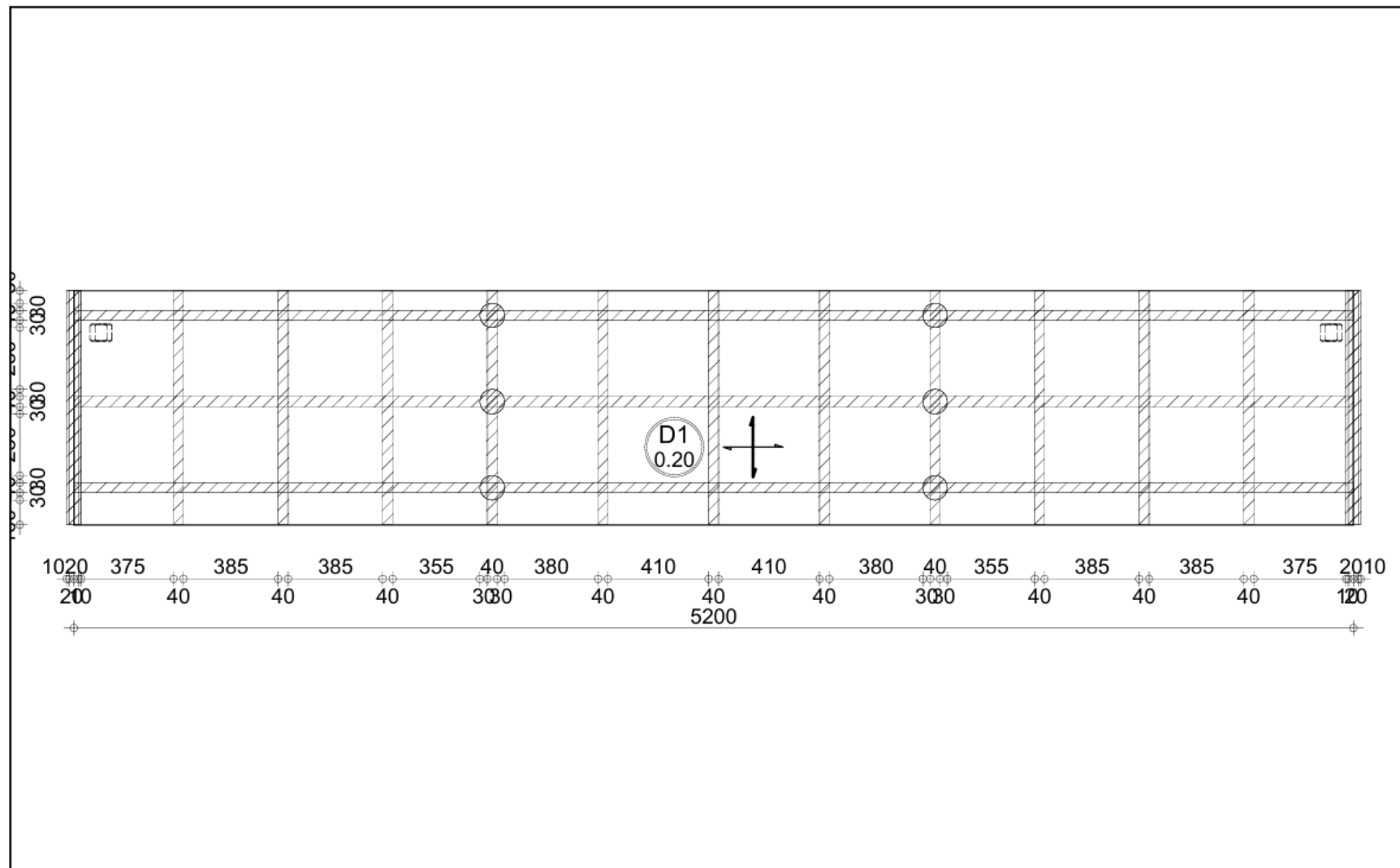












|        |                           |          |                      |                              |                 |                              |  |
|--------|---------------------------|----------|----------------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|--|
|        |                           | Tél. Fax |                      | Béton : C30/37 = 98.8 m3     |                 | Enrobage<br>supérieur = 4 cm |  |
| Niveau | Niveau +6,00              | Elément: | Dalle29              | Surface du coffrage = 494 m2 |                 | inférieur = 4 cm             |  |
| Sujet: | Pont Poutre en béton armé | Dessin:  | COFFRAGE DE LA DALLE | Echelle : 1/200              | Date : 03/02/26 | Page 1/6                     |  |

| Pos. | Armature | Code   | Forme | Acier | Pos.   | Armature | Code             | Forme     | Acier | Pos.       | Armature | Code | Forme            | Acier     |            |
|------|----------|--------|-------|-------|--------|----------|------------------|-----------|-------|------------|----------|------|------------------|-----------|------------|
| 1    | 948Ø14   | l=270  | 00    | 269   | HA 500 | 19       | 78Ø14            | l=1001    | 00    | 1001       | HA 500   | 11   | x3.60<br>/14.40  | 2ST 65 C  | 300<br>120 |
| 2    | 23Ø14    | l=445  | 00    | 445   | HA 500 | 20       | 24Ø14            | l=1101    | 00    | 1101       | HA 500   | 12   | x1.03<br>/14.40  | 2ST 65 C  | 300<br>120 |
| 3    | 16Ø14    | l=545  | 00    | 545   | HA 500 | 21       | 7Ø14             | l=291     | 00    | 291        | HA 500   | 13   | x13.55<br>/14.40 | 18ST 65 C | 600<br>226 |
| 4    | 32Ø14    | l=845  | 00    | 845   | HA 500 | 22       | 9Ø14             | l=333     | 00    | 333        | HA 500   | 14   | x2.39<br>/14.40  | 2ST 65 C  | 106<br>226 |
| 5    | 47Ø14    | l=945  | 00    | 945   | HA 500 | 23       | 175Ø14           | l=386     | 00    | 386        | HA 500   | 15   | x2.02<br>/14.40  | 2ST 65 C  | 168<br>120 |
| 6    | 78Ø14    | l=1045 | 00    | 1045  | HA 500 | 24       | 16Ø14            | l=428     | 00    | 428        | HA 500   | 16   | x0.58<br>/14.40  | 2ST 65 C  | 168<br>120 |
| 7    | 24Ø14    | l=1145 | 00    | 1145  | HA 500 | 25       | 57Ø14            | l=481     | 00    | 481        | HA 500   | 17   | x2.81<br>/14.40  | 2ST 65 C  | 234<br>120 |
| 8    | 7Ø14     | l=335  | 00    | 335   | HA 500 | 26       | 10Ø14            | l=618     | 00    | 618        | HA 500   | 18   | x0.80<br>/14.40  | 2ST 65 C  | 234<br>120 |
| 9    | 9Ø14     | l=355  | 00    | 354   | HA 500 | 1        | x4.80<br>/14.40  | 6ST 65 C  |       | 400<br>120 |          | 19   | x4.80<br>/14.40  | 6ST 65 C  | 200<br>240 |
| 10   | 175Ø14   | l=430  | 00    | 430   | HA 500 | 2        | x1.37<br>/14.40  | 6ST 65 C  |       | 400<br>120 |          | 20   | x1.08<br>/14.40  | 2ST 65 C  | 200<br>174 |
| 11   | 16Ø14    | l=450  | 00    | 449   | HA 500 | 3        | x14.40<br>/14.40 | 90ST 65 C |       | 600<br>240 |          | 21   | x3.47<br>/14.40  | 2ST 65 C  | 200<br>174 |
| 12   | 57Ø14    | l=525  | 00    | 525   | HA 500 | 4        | x2.54<br>/14.40  | 10ST 65 C |       | 106<br>240 |          |      |                  |           |            |
| 13   | 10Ø14    | l=640  | 00    | 639   | HA 500 | 5        | x7.56<br>/14.40  | 18ST 65 C |       | 600<br>126 |          |      |                  |           |            |
| 14   | 948Ø14   | l=248  | 00    | 248   | HA 500 | 6        | x1.34<br>/14.40  | 2ST 65 C  |       | 106<br>126 |          |      |                  |           |            |
| 15   | 23Ø14    | l=401  | 00    | 401   | HA 500 | 7        | x7.20<br>/14.40  | 12ST 65 C |       | 600<br>120 |          |      |                  |           |            |
| 16   | 16Ø14    | l=501  | 00    | 501   | HA 500 | 8        | x0.82<br>/14.40  | 2ST 65 C  |       | 68<br>120  |          |      |                  |           |            |
| 17   | 32Ø14    | l=801  | 00    | 801   | HA 500 | 9        | x2.06<br>/14.40  | 12ST 65 C |       | 600<br>120 |          |      |                  |           |            |
| 18   | 47Ø14    | l=901  | 00    | 901   | HA 500 | 10       | x0.23<br>/14.40  | 2ST 65 C  |       | 68<br>34   |          |      |                  |           |            |

R

PRO

Tél.

Fax

Niveau

Niveau +6,00

Sujet:

Pont Poutre en béton armé

Elément:

Dalle29

Dessin:

NOMENCLATURE

Béton : C30/37 = 98.8 m3

Acier HA 500 = 13500 kg

Date : 03/02/26

Enrobage

supérieur = 4 cm

inférieur = 4 cm

Page 4/6

# NOTE DE CALCUL

Projet: Pont Poutre en béton armé

Auteur:

## Réactions Repère global - Cas: 1 2 9A11 19 20 22 23

Valeurs

## Repère global - Cas: 1 2 9A11 19 20 22 23

| Filtre             | Noeud           | Cas               |
|--------------------|-----------------|-------------------|
| Liste complète     | 1A89 91A94 96A1 | 1A4 9A13 18A23    |
| Sélection          | 1A11P2 100 102A | 1 2 9A11 19 20 22 |
|                    |                 |                   |
| Nombre total       | 855             | 15                |
| Nombre sélectionné | 48              | 9                 |

## Repère global - Cas: 1 2 9A11 19 20 22 23

| Noeud/Cas | FX [kN] | FY [kN] | FZ [kN] | MX [kNm] |
|-----------|---------|---------|---------|----------|
| 1/ 1      | -4,22   | 0,51    | 824,80  | -2,46    |
| 1/ 2      | 0,39    | -0,14   | 152,54  | 0,12     |
| 1/ 9      | 0,06    | 0,02    | -0,02   | -0,02    |
| 1/ 10     | -0,12   | -0,97   | -3,29   | 2,62     |
| 1/ 11     | -0,17   | -1,60   | -12,42  | 3,52     |
| 1/ ELU+   | 95,10   | 10,28   | 1407,12 | 11,72    |
| 1/ ELU-   | -103,46 | -5,28   | 1303,62 | -26,28   |
| 1/ ELS+   | 96,49   | 11,44   | 1050,04 | 9,46     |
| 1/ ELS-   | -102,07 | -4,12   | 946,54  | -28,53   |
| 3/ 1      | -3,85   | 0,89    | 814,03  | -3,07    |
| 3/ 2      | 0,37    | -0,01   | 148,77  | -0,06    |
| 3/ 9      | 0,05    | 0,01    | -0,11   | -0,03    |
| 3/ 10     | -0,03   | -1,34   | -1,64   | 3,16     |
| 3/ 11     | 0,01    | -0,91   | -7,17   | 2,92     |
| 3/ ELU+   | 239,76  | 21,53   | 2120,39 | 10,31    |
| 3/ ELU-   | -240,25 | -4,02   | 1284,53 | -42,13   |
| 3/ ELS+   | 240,91  | 22,34   | 1765,55 | 8,39     |
| 3/ ELS-   | -239,10 | -3,21   | 929,69  | -44,05   |
| 5/ 1      | -3,55   | -3,95   | 725,62  | 6,73     |
| 5/ 2      | 0,32    | -1,29   | 123,76  | 2,56     |
| 5/ 9      | 0,01    | 0,01    | -0,15   | -0,02    |
| 5/ 10     | 0,08    | -0,94   | 0,03    | 2,59     |
| 5/ 11     | 0,15    | -0,80   | -1,36   | 2,61     |
| 5/ ELU+   | 355,06  | -0,47   | 2059,54 | 66,73    |
| 5/ ELU-   | -347,59 | -32,74  | 1126,17 | -5,16    |

|    |      |         |        |         |        |
|----|------|---------|--------|---------|--------|
| 5/ | ELS+ | 356,01  | 2,42   | 1744,43 | 60,50  |
| 5/ | ELS- | -346,63 | -29,84 | 811,07  | -11,38 |
| 7/ | 1    | 4,21    | 0,52   | 824,78  | -2,46  |
| 7/ | 2    | -0,39   | -0,14  | 152,54  | 0,12   |
| 7/ | 9    | -0,40   | 0,00   | -1,28   | -0,02  |
| 7/ | 10   | 0,03    | -0,90  | -3,38   | 2,48   |
| 7/ | 11   | 0,01    | -1,52  | -13,18  | 3,40   |

| Noeud/Cas |      | FX [kN] | FY [kN] | FZ [kN] | MX [kNm] |
|-----------|------|---------|---------|---------|----------|
| 7/        | ELU+ | 102,92  | 10,52   | 1403,33 | 11,24    |
| 7/        | ELU- | -95,46  | -5,04   | 1300,65 | -26,58   |
| 7/        | ELS+ | 101,82  | 11,61   | 1047,31 | 9,11     |
| 7/        | ELS- | -96,55  | -3,95   | 944,63  | -28,71   |
| 9/        | 1    | 3,81    | 0,84    | 814,12  | -2,96    |
| 9/        | 2    | -0,39   | -0,03   | 148,80  | -0,02    |
| 9/        | 9    | -0,34   | -0,01   | -1,16   | -0,00    |
| 9/        | 10   | -0,03   | -1,06   | -1,52   | 2,80     |
| 9/        | 11   | -0,04   | -0,93   | -7,22   | 2,93     |
| 9/        | ELU+ | 239,51  | 21,43   | 2121,17 | 10,01    |
| 9/        | ELU- | -239,02 | -3,75   | 1283,24 | -41,55   |
| 9/        | ELS+ | 238,57  | 22,16   | 1766,78 | 8,19     |
| 9/        | ELS- | -239,96 | -3,02   | 928,84  | -43,37   |
| 11/       | 1    | 3,57    | -3,72   | 725,54  | 6,29     |
| 11/       | 2    | -0,31   | -1,20   | 123,74  | 2,39     |
| 11/       | 9    | -0,37   | 0,03    | -0,92   | -0,05    |
| 11/       | 10   | -0,12   | -0,80   | 0,29    | 2,38     |
| 11/       | 11   | -0,15   | -0,79   | -1,11   | 2,58     |
| 11/       | ELU+ | 347,10  | 0,24    | 2059,50 | 64,80    |
| 11/       | ELU- | -353,91 | -31,67  | 1125,66 | -6,44    |
| 11/       | ELS+ | 346,32  | 2,93    | 1744,56 | 58,94    |
| 11/       | ELS- | -354,69 | -28,99  | 810,73  | -12,30   |
| 100/      | 1    | -7,80   | 23,28   | 142,03  | 3,73     |
| 100/      | 2    | -67,35  | 23,39   | 155,62  | -5,60    |
| 100/      | 9    | -0,35   | -0,24   | 0,56    | -0,03    |
| 100/      | 10   | -0,29   | -0,62   | -0,96   | 0,14     |
| 100/      | 11   | -0,17   | -0,64   | -1,74   | 0,17     |
| 100/      | ELU+ | -100,54 | 73,83   | 459,15  | 0,09     |
| 100/      | ELU- | -125,31 | 62,48   | 382,49  | -6,09    |
| 100/      | ELS+ | -63,72  | 54,74   | 332,70  | 1,45     |
| 100/      | ELS- | -88,50  | 43,39   | 256,04  | -4,73    |

|           |        |       |        |       |
|-----------|--------|-------|--------|-------|
| 102/ 1    | 5,70   | 19,57 | 146,91 | -0,63 |
| 102/ 2    | -52,87 | 7,37  | 67,61  | -5,26 |
| 102/ 9    | 0,01   | -0,27 | 0,10   | -0,04 |
| 102/ 10   | -0,17  | -1,00 | -0,51  | 0,07  |
| 102/ 11   | -0,31  | -0,99 | -1,25  | 0,09  |
| 102/ ELU+ | -67,67 | 48,06 | 346,35 | -7,59 |
| 102/ ELU- | -74,96 | 25,93 | 270,58 | -8,81 |
| 102/ ELS+ | -43,00 | 38,65 | 261,96 | -4,80 |
| 102/ ELS- | -50,29 | 16,52 | 186,18 | -6,02 |
| 103/ 1    | 20,22  | 12,62 | 160,01 | -0,50 |
| 103/ 2    | -84,45 | 13,69 | 31,41  | -1,87 |
| 103/ 9    | -0,18  | -0,15 | -0,28  | -0,02 |
| 103/ 10   | -0,21  | -1,10 | -0,32  | 0,04  |

| Noeud/Cas | FX [kN] | FY [kN] | FZ [kN] | MX [kNm] |
|-----------|---------|---------|---------|----------|
| 103/ 11   | -0,42   | -1,06   | -1,01   | 0,05     |
| 103/ ELU+ | -79,87  | 50,85   | 332,04  | -1,76    |
| 103/ ELU- | -104,29 | 27,16   | 241,89  | -3,46    |
| 103/ ELS+ | -44,32  | 40,75   | 261,13  | -0,68    |
| 103/ ELS- | -68,74  | 17,05   | 170,99  | -2,39    |
| 104/ 1    | 31,75   | 6,65    | 166,78  | -0,43    |
| 104/ 2    | -105,94 | 10,11   | 20,88   | -0,95    |
| 104/ 9    | -0,41   | -0,08   | -0,48   | -0,01    |
| 104/ 10   | -0,23   | -1,15   | -0,25   | 0,02     |
| 104/ 11   | -0,42   | -1,06   | -0,90   | 0,03     |
| 104/ ELU+ | -79,75  | 38,33   | 350,23  | 0,07     |
| 104/ ELU- | -123,25 | 14,72   | 239,41  | -2,00    |
| 104/ ELS+ | -37,36  | 32,08   | 282,23  | 0,68     |
| 104/ ELS- | -80,86  | 8,48    | 171,41  | -1,39    |
| 105/ 1    | 38,03   | 2,70    | 169,60  | -0,25    |
| 105/ 2    | -116,28 | 5,14    | 16,92   | -0,45    |
| 105/ 9    | -0,54   | -0,03   | -0,57   | -0,00    |
| 105/ 10   | -0,24   | -1,17   | -0,22   | 0,02     |
| 105/ 11   | -0,35   | -1,04   | -0,83   | 0,02     |
| 105/ ELU+ | -72,46  | 24,79   | 375,00  | 1,28     |
| 105/ ELU- | -131,94 | 3,11    | 239,76  | -0,98    |
| 105/ ELS+ | -27,06  | 22,40   | 307,99  | 1,58     |
| 105/ ELS- | -86,54  | 0,71    | 172,76  | -0,68    |
| 106/ 1    | 39,46   | -0,04   | 170,56  | -0,02    |
| 106/ 2    | -119,12 | -0,20   | 15,86   | -0,08    |

|           |         |        |        |       |
|-----------|---------|--------|--------|-------|
| 106/ 9    | -0,58   | 0,01   | -0,60  | 0,00  |
| 106/ 10   | -0,21   | -1,16  | -0,19  | 0,02  |
| 106/ 11   | -0,28   | -1,02  | -0,78  | 0,02  |
| 106/ ELU+ | -64,74  | 9,59   | 402,12 | 2,09  |
| 106/ ELU- | -135,05 | -7,30  | 240,67 | -0,13 |
| 106/ ELS+ | -18,45  | 10,79  | 335,29 | 2,12  |
| 106/ ELS- | -88,77  | -6,09  | 173,84 | -0,10 |
| 115/ 1    | 36,62   | -2,83  | 170,37 | 0,19  |
| 115/ 2    | -115,43 | -5,52  | 16,91  | 0,30  |
| 115/ 9    | -0,53   | 0,05   | -0,56  | 0,01  |
| 115/ 10   | -0,13   | -1,13  | -0,14  | 0,02  |
| 115/ 11   | -0,21   | -1,00  | -0,74  | 0,02  |
| 115/ ELU+ | -59,91  | -6,85  | 428,30 | 2,66  |
| 115/ ELU- | -133,12 | -17,56 | 242,05 | 0,68  |
| 115/ ELS+ | -14,58  | -2,05  | 360,93 | 2,42  |
| 115/ ELS- | -87,79  | -12,77 | 174,69 | 0,44  |
| 116/ 1    | 29,33   | -6,93  | 168,44 | 0,35  |
| 116/ 2    | -103,89 | -10,38 | 20,97  | 0,83  |
| 116/ 9    | -0,38   | 0,10   | -0,46  | 0,01  |

| Noeud/Cas | FX [kN] | FY [kN] | FZ [kN] | MX [kNm] |
|-----------|---------|---------|---------|----------|
| 116/ 10   | 0,01    | -1,07   | -0,00   | 0,04     |
| 116/ 11   | -0,14   | -0,97   | -0,70   | 0,02     |
| 116/ ELU+ | -59,39  | -25,02  | 450,90  | 3,56     |
| 116/ ELU- | -124,16 | -33,57  | 244,49  | 1,67     |
| 116/ ELS+ | -17,45  | -16,43  | 382,04  | 2,99     |
| 116/ ELS- | -82,22  | -24,98  | 175,63  | 1,10     |
| 117/ 1    | 17,93   | -13,15  | 162,96  | 0,51     |
| 117/ 2    | -81,22  | -13,15  | 32,09   | 1,95     |
| 117/ 9    | -0,15   | 0,17    | -0,26   | 0,02     |
| 117/ 10   | 0,16    | -0,95   | 0,29    | 0,06     |
| 117/ 11   | -0,07   | -0,92   | -0,62   | 0,03     |
| 117/ ELU+ | -58,43  | -38,12  | 470,04  | 5,01     |
| 117/ ELU- | -103,06 | -58,94  | 251,60  | 3,60     |
| 117/ ELS+ | -24,06  | -26,09  | 397,26  | 3,80     |
| 117/ ELS- | -68,69  | -46,91  | 178,82  | 2,39     |
| 118/ 1    | 4,97    | -18,54  | 150,40  | 0,19     |
| 118/ 2    | -47,03  | -6,97   | 67,16   | 4,22     |
| 118/ 9    | 0,01    | 0,28    | 0,12    | 0,04     |
| 118/ 10   | 0,21    | -0,68   | 0,93    | 0,10     |

|      |      |         |         |        |       |
|------|------|---------|---------|--------|-------|
| 118/ | 11   | 0,02    | -0,82   | -0,48  | 0,04  |
| 118/ | ELU+ | -47,69  | -33,57  | 502,87 | 7,52  |
| 118/ | ELU- | -67,12  | -67,68  | 282,87 | 6,14  |
| 118/ | ELS+ | -26,04  | -22,99  | 416,37 | 5,25  |
| 118/ | ELS- | -45,47  | -57,09  | 196,37 | 3,87  |
| 121/ | 1    | -6,73   | -23,68  | 145,61 | -4,34 |
| 121/ | 2    | -64,56  | -23,50  | 158,53 | 5,80  |
| 121/ | 9    | -0,36   | 0,24    | 0,62   | 0,03  |
| 121/ | 10   | -0,12   | -0,41   | 1,96   | 0,12  |
| 121/ | 11   | 0,47    | -0,51   | -0,18  | 0,11  |
| 121/ | ELU+ | -82,73  | -67,83  | 633,04 | 6,95  |
| 121/ | ELU- | -120,71 | -107,94 | 405,27 | -2,58 |
| 121/ | ELS+ | -48,09  | -47,45  | 501,62 | 5,44  |
| 121/ | ELS- | -86,07  | -87,55  | 273,84 | -4,10 |
| 177/ | 1    | 7,81    | 23,28   | 142,04 | 3,73  |
| 177/ | 2    | 67,36   | 23,39   | 155,64 | -5,60 |
| 177/ | 9    | -0,06   | -0,02   | -0,34  | -0,04 |
| 177/ | 10   | 0,15    | -0,35   | -0,66  | 0,06  |
| 177/ | 11   | 0,21    | -0,64   | -1,73  | 0,17  |
| 177/ | ELU+ | 124,57  | 73,68   | 457,92 | -0,02 |
| 177/ | ELU- | 99,66   | 63,20   | 381,22 | -6,21 |
| 177/ | ELS+ | 88,01   | 54,35   | 331,75 | 1,38  |
| 177/ | ELS- | 63,10   | 43,86   | 255,05 | -4,81 |
| 179/ | 1    | -5,70   | 19,57   | 146,92 | -0,63 |
| 179/ | 2    | 52,87   | 7,37    | 67,62  | -5,26 |

| Noeud/Cas | FX [kN] | FY [kN] | FZ [kN] | MX [kNm] |
|-----------|---------|---------|---------|----------|
| 179/ 9    | -0,06   | 0,01    | -0,38   | -0,00    |
| 179/ 10   | 0,05    | -0,53   | -0,38   | 0,03     |
| 179/ 11   | 0,33    | -0,99   | -1,30   | 0,09     |
| 179/ ELU+ | 74,77   | 47,24   | 345,52  | -7,67    |
| 179/ ELU- | 67,47   | 26,95   | 269,73  | -8,81    |
| 179/ ELS+ | 50,17   | 37,47   | 261,32  | -4,88    |
| 179/ ELS- | 42,87   | 17,18   | 185,53  | -6,01    |
| 180/ 1    | -20,22  | 12,61   | 160,02  | -0,50    |
| 180/ 2    | 84,45   | 13,69   | 31,41   | -1,87    |
| 180/ 9    | -0,07   | 0,02    | -0,41   | -0,00    |
| 180/ 10   | -0,00   | -0,58   | -0,27   | 0,02     |
| 180/ 11   | 0,45    | -1,04   | -1,08   | 0,05     |
| 180/ ELU+ | 103,64  | 49,99   | 331,24  | -1,90    |

|      |      |        |       |        |       |
|------|------|--------|-------|--------|-------|
| 180/ | ELU- | 79,23  | 28,13 | 241,51 | -3,46 |
| 180/ | ELS+ | 68,30  | 39,53 | 260,41 | -0,82 |
| 180/ | ELS- | 43,89  | 17,68 | 170,68 | -2,39 |
| 181/ | 1    | -31,75 | 6,64  | 166,79 | -0,43 |
| 181/ | 2    | 105,94 | 10,11 | 20,88  | -0,95 |
| 181/ | 9    | -0,06  | 0,03  | -0,42  | -0,00 |
| 181/ | 10   | -0,06  | -0,61 | -0,24  | 0,01  |
| 181/ | 11   | 0,45   | -1,03 | -0,96  | 0,04  |
| 181/ | ELU+ | 122,16 | 37,53 | 348,94 | -0,10 |
| 181/ | ELU- | 78,71  | 15,66 | 239,29 | -2,00 |
| 181/ | ELS+ | 80,13  | 30,96 | 280,93 | 0,51  |
| 181/ | ELS- | 36,69  | 9,09  | 171,29 | -1,39 |
| 182/ | 1    | -38,03 | 2,70  | 169,60 | -0,25 |
| 182/ | 2    | 116,28 | 5,14  | 16,91  | -0,45 |
| 182/ | 9    | -0,06  | 0,02  | -0,42  | -0,00 |
| 182/ | 10   | -0,09  | -0,62 | -0,25  | 0,01  |
| 182/ | 11   | 0,38   | -1,01 | -0,88  | 0,03  |
| 182/ | ELU+ | 130,56 | 24,49 | 372,91 | 1,13  |
| 182/ | ELU- | 71,05  | 3,99  | 239,77 | -0,99 |
| 182/ | ELS+ | 85,62  | 21,79 | 305,87 | 1,42  |
| 182/ | ELS- | 26,11  | 1,29  | 172,72 | -0,69 |
| 183/ | 1    | -39,47 | -0,04 | 170,57 | -0,02 |
| 183/ | 2    | 119,12 | -0,20 | 15,85  | -0,08 |
| 183/ | 9    | -0,07  | 0,01  | -0,43  | -0,00 |
| 183/ | 10   | -0,11  | -0,64 | -0,29  | 0,00  |
| 183/ | 11   | 0,30   | -1,00 | -0,81  | 0,02  |
| 183/ | ELU+ | 133,61 | 10,30 | 399,68 | 2,01  |
| 183/ | ELU- | 63,27  | -6,48 | 240,66 | -0,15 |
| 183/ | ELS+ | 87,81  | 11,22 | 332,81 | 2,04  |
| 183/ | ELS- | 17,46  | -5,55 | 173,80 | -0,11 |
| 192/ | 1    | -36,63 | -2,84 | 170,38 | 0,19  |

| Noeud/Cas | FX [kN] | FY [kN] | FZ [kN] | MX [kNm] |
|-----------|---------|---------|---------|----------|
| 192/ 2    | 115,43  | -5,53   | 16,91   | 0,30     |
| 192/ 9    | -0,07   | 0,00    | -0,43   | -0,00    |
| 192/ 10   | -0,10   | -0,65   | -0,35   | 0,00     |
| 192/ 11   | 0,21    | -0,98   | -0,75   | 0,02     |
| 192/ ELU+ | 131,86  | -6,14   | 425,49  | 2,66     |
| 192/ ELU- | 58,61   | -16,88  | 241,83  | 0,65     |
| 192/ ELS+ | 86,95   | -1,57   | 358,17  | 2,43     |

|      |      |        |         |        |       |
|------|------|--------|---------|--------|-------|
| 192/ | ELS- | 13,69  | -12,31  | 174,51 | 0,42  |
| 193/ | 1    | -29,33 | -6,93   | 168,44 | 0,36  |
| 193/ | 2    | 103,89 | -10,39  | 20,96  | 0,83  |
| 193/ | 9    | -0,08  | -0,00   | -0,44  | -0,00 |
| 193/ | 10   | -0,07  | -0,66   | -0,43  | 0,00  |
| 193/ | 11   | 0,14   | -0,95   | -0,68  | 0,02  |
| 193/ | ELU+ | 123,34 | -24,54  | 447,51 | 3,50  |
| 193/ | ELU- | 58,52  | -32,10  | 243,81 | 1,60  |
| 193/ | ELS+ | 81,67  | -16,12  | 378,85 | 2,95  |
| 193/ | ELS- | 16,85  | -23,67  | 175,14 | 1,05  |
| 194/ | 1    | -17,94 | -13,16  | 162,96 | 0,51  |
| 194/ | 2    | 81,22  | -13,15  | 32,08  | 1,95  |
| 194/ | 9    | -0,08  | -0,00   | -0,44  | 0,00  |
| 194/ | 10   | -0,07  | -0,67   | -0,54  | 0,00  |
| 194/ | 11   | 0,06   | -0,90   | -0,59  | 0,03  |
| 194/ | ELU+ | 102,81 | -38,02  | 465,39 | 4,90  |
| 194/ | ELU- | 58,15  | -56,70  | 250,00 | 3,48  |
| 194/ | ELS+ | 68,53  | -26,05  | 393,10 | 3,72  |
| 194/ | ELS- | 23,86  | -44,73  | 177,70 | 2,31  |
| 195/ | 1    | -4,98  | -18,54  | 150,41 | 0,20  |
| 195/ | 2    | 47,03  | -6,98   | 67,15  | 4,22  |
| 195/ | 9    | -0,06  | 0,00    | -0,43  | 0,00  |
| 195/ | 10   | -0,10  | -0,63   | -0,69  | 0,01  |
| 195/ | 11   | -0,04  | -0,80   | -0,44  | 0,04  |
| 195/ | ELU+ | 67,19  | -33,90  | 495,37 | 7,33  |
| 195/ | ELU- | 47,76  | -66,35  | 279,46 | 5,94  |
| 195/ | ELS+ | 45,51  | -23,21  | 409,93 | 5,12  |
| 195/ | ELS- | 26,09  | -55,66  | 194,02 | 3,74  |
| 198/ | 1    | 6,74   | -23,69  | 145,62 | -4,34 |
| 198/ | 2    | 64,56  | -23,50  | 158,53 | 5,80  |
| 198/ | 9    | -0,05  | 0,04    | -0,42  | 0,04  |
| 198/ | 10   | -0,53  | -0,34   | -0,86  | 0,13  |
| 198/ | 11   | -0,47  | -0,50   | -0,16  | 0,11  |
| 198/ | ELU+ | 119,16 | -68,00  | 616,01 | 6,98  |
| 198/ | ELU- | 81,27  | -105,88 | 399,17 | -2,16 |
| 198/ | ELS+ | 85,05  | -47,56  | 486,50 | 5,46  |
| 198/ | ELS- | 47,16  | -85,44  | 269,66 | -3,68 |

| Noeud/Cas | FX [kN] | FY [kN] | FZ [kN] | MX [kNm] |
|-----------|---------|---------|---------|----------|
| 779/ 1    | 17,38   | 1,36    | 51,47   | -5,54    |

|      |      |        |        |         |         |
|------|------|--------|--------|---------|---------|
| 779/ | 2    | -36,21 | 105,70 | -103,61 | -103,24 |
| 779/ | 9    | -0,33  | 0,89   | -0,94   | -1,04   |
| 779/ | 10   | -0,45  | -0,44  | -1,39   | 0,63    |
| 779/ | 11   | -0,39  | -0,87  | -1,05   | 1,19    |
| 779/ | ELU+ | -18,14 | 160,93 | -42,09  | -159,17 |
| 779/ | ELU- | -47,57 | 159,12 | -139,88 | -165,37 |
| 779/ | ELS+ | -5,53  | 107,82 | -6,61   | -106,00 |
| 779/ | ELS- | -34,96 | 106,01 | -104,40 | -112,20 |
| 789/ | 1    | 17,97  | 13,00  | 122,92  | -10,90  |
| 789/ | 2    | -63,65 | 54,72  | 49,35   | -48,44  |
| 789/ | 9    | -0,49  | -0,02  | 0,14    | -0,28   |
| 789/ | 10   | -0,67  | -0,21  | -0,76   | 0,38    |
| 789/ | 11   | -0,70  | -0,39  | -1,27   | 0,68    |
| 789/ | ELU+ | -59,14 | 109,85 | 248,45  | -83,86  |
| 789/ | ELU- | -90,80 | 96,76  | 222,02  | -94,00  |
| 789/ | ELS+ | -32,68 | 78,26  | 181,69  | -56,22  |
| 789/ | ELS- | -64,34 | 65,16  | 155,26  | -66,35  |
| 790/ | 1    | 24,69  | 10,93  | 108,35  | -13,48  |
| 790/ | 2    | -66,00 | 98,93  | -5,64   | -93,83  |
| 790/ | 9    | -0,54  | 0,33   | -0,21   | -0,72   |
| 790/ | 10   | -0,65  | -0,29  | -0,83   | 0,60    |
| 790/ | 11   | -0,72  | -0,66  | -1,04   | 1,17    |
| 790/ | ELU+ | -51,40 | 172,21 | 141,25  | -153,99 |
| 790/ | ELU- | -87,32 | 160,16 | 123,89  | -168,01 |
| 790/ | ELS+ | -26,09 | 119,23 | 107,18  | -102,88 |
| 790/ | ELS- | -62,01 | 107,18 | 89,83   | -116,90 |
| 791/ | 1    | 25,87  | 7,83   | 91,89   | -13,05  |
| 791/ | 2    | -58,71 | 129,94 | -43,28  | -139,19 |
| 791/ | 9    | -0,51  | 0,71   | -0,49   | -1,25   |
| 791/ | 10   | -0,62  | -0,44  | -1,07   | 0,85    |
| 791/ | 11   | -0,68  | -0,95  | -0,96   | 1,67    |
| 791/ | ELU+ | -39,01 | 211,13 | 81,89   | -220,64 |
| 791/ | ELU- | -74,60 | 202,57 | 24,54   | -234,55 |
| 791/ | ELS+ | -17,80 | 143,77 | 72,63   | -147,12 |
| 791/ | ELS- | -53,39 | 135,20 | 15,27   | -161,03 |
| 792/ | 1    | 21,63  | 6,10   | 82,56   | -11,86  |
| 792/ | 2    | -44,66 | 166,16 | -100,51 | -182,44 |
| 792/ | 9    | -0,40  | 1,19   | -0,95   | -1,79   |
| 792/ | 10   | -0,51  | -0,66  | -1,61   | 1,11    |
| 792/ | 11   | -0,53  | -1,35  | -1,19   | 2,13    |
| 792/ | ELU+ | -25,64 | 261,14 | 9,06    | -283,48 |
| 792/ | ELU- | -55,53 | 254,38 | -100,66 | -296,49 |

|           |        |        |       |         |
|-----------|--------|--------|-------|---------|
| 792/ ELS+ | -10,17 | 176,33 | 32,29 | -188,83 |
|-----------|--------|--------|-------|---------|

| Noeud/Cas | FX [kN] | FY [kN] | FZ [kN] | MX [kNm] |
|-----------|---------|---------|---------|----------|
| 792/ ELS- | -40,06  | 169,57  | -77,42  | -201,85  |
| 820/ 1    | 17,98   | -1,05   | 51,26   | 4,73     |
| 820/ 2    | -36,77  | -105,70 | -105,22 | 103,14   |
| 820/ 9    | -0,35   | -0,89   | -1,01   | 1,03     |
| 820/ 10   | 0,01    | -1,07   | 0,09    | 1,48     |
| 820/ 11   | 0,56    | 0,01    | 1,92    | 0,05     |
| 820/ ELU+ | -2,20   | -162,03 | -24,48  | 175,42   |
| 820/ ELU- | -48,03  | -165,32 | -142,12 | 162,50   |
| 820/ ELS+ | 9,77    | -107,84 | 9,68    | 120,91   |
| 820/ ELS- | -36,06  | -111,12 | -107,95 | 107,99   |
| 836/ 1    | 23,23   | -5,36   | 81,36   | 10,30    |
| 836/ 2    | -45,45  | -166,00 | -101,87 | 182,18   |
| 836/ 9    | -0,42   | -1,19   | -1,02   | 1,76     |
| 836/ 10   | -0,00   | -1,43   | 0,28    | 2,55     |
| 836/ 11   | 0,54    | 0,01    | 2,23    | 0,10     |
| 836/ ELU+ | 12,88   | -257,79 | 14,27   | 316,46   |
| 836/ ELU- | -55,96  | -271,96 | -98,70  | 288,94   |
| 836/ ELS+ | 27,41   | -171,60 | 35,99   | 219,55   |
| 836/ ELS- | -41,42  | -185,77 | -76,98  | 192,03   |
| 837/ 1    | 28,00   | -7,17   | 92,01   | 11,64    |
| 837/ 2    | -59,86  | -129,65 | -44,03  | 138,82   |
| 837/ 9    | -0,54   | -0,71   | -0,53   | 1,23     |
| 837/ 10   | -0,02   | -0,79   | 0,43    | 1,83     |
| 837/ 11   | 0,63    | 0,02    | 1,27    | 0,08     |
| 837/ ELU+ | 17,11   | -203,92 | 93,17   | 253,82   |
| 837/ ELU- | -75,51  | -221,81 | 31,62   | 224,03   |
| 837/ ELS+ | 37,20   | -135,84 | 82,40   | 178,76   |
| 837/ ELS- | -55,42  | -153,73 | 20,84   | 148,97   |
| 838/ 1    | 26,73   | -10,20  | 110,14  | 12,34    |
| 838/ 2    | -67,57  | -98,40  | -6,17   | 93,36    |
| 838/ 9    | -0,57   | -0,33   | -0,22   | 0,71     |
| 838/ 10   | -0,00   | -0,39   | 0,64    | 1,15     |
| 838/ 11   | 0,65    | 0,01    | 0,64    | 0,08     |
| 838/ ELU+ | 8,15    | -159,78 | 217,43  | 185,36   |
| 838/ ELU- | -88,90  | -183,48 | 133,04  | 155,66   |
| 838/ ELS+ | 32,54   | -106,66 | 181,43  | 133,39   |
| 838/ ELS- | -64,51  | -130,35 | 97,04   | 103,69   |

|           |        |         |        |        |
|-----------|--------|---------|--------|--------|
| 839/ 1    | 19,32  | -12,59  | 125,86 | 10,33  |
| 839/ 2    | -65,29 | -54,25  | 49,47  | 48,10  |
| 839/ 9    | -0,52  | 0,03    | 0,16   | 0,28   |
| 839/ 10   | 0,10   | -0,11   | 1,14   | 0,59   |
| 839/ 11   | 0,68   | -0,05   | 0,14   | 0,10   |
| 839/ ELU+ | -11,07 | -96,52  | 381,26 | 107,38 |
| 839/ ELU- | -91,80 | -121,44 | 233,92 | 85,21  |

| Noeud/Cas | FX [kN] | FY [kN] | FZ [kN] | MX [kNm] |
|-----------|---------|---------|---------|----------|
| 839/ ELS+ | 14,68   | -64,93  | 311,75  | 79,23    |
| 839/ ELS- | -66,05  | -89,84  | 164,41  | 57,06    |
| 863/ 1    | -17,38  | 1,36    | 51,45   | -5,54    |
| 863/ 2    | 36,21   | 105,70  | -103,62 | -103,24  |
| 863/ 9    | -0,06   | 0,03    | 0,26    | -0,05    |
| 863/ 10   | 0,22    | -0,17   | -0,68   | 0,27     |
| 863/ 11   | 0,43    | -0,88   | -1,14   | 1,20     |
| 863/ ELU+ | 46,78   | 160,04  | -38,93  | -158,20  |
| 863/ ELU- | 17,14   | 158,22  | -137,37 | -164,41  |
| 863/ ELS+ | 34,46   | 107,22  | -4,35   | -105,35  |
| 863/ ELS- | 4,82    | 105,40  | -102,79 | -111,56  |
| 873/ 1    | -17,96  | 13,00   | 122,93  | -10,90   |
| 873/ 2    | 63,65   | 54,72   | 49,35   | -48,44   |
| 873/ 9    | -0,03   | 0,04    | -0,17   | -0,04    |
| 873/ 10   | 0,32    | -0,08   | -0,48   | 0,17     |
| 873/ 11   | 0,77    | -0,42   | -1,32   | 0,69     |
| 873/ ELU+ | 89,74   | 110,13  | 248,31  | -83,80   |
| 873/ ELU- | 57,83   | 97,02   | 221,74  | -93,94   |
| 873/ ELS+ | 63,67   | 78,45   | 181,60  | -56,18   |
| 873/ ELS- | 31,76   | 65,33   | 155,02  | -66,32   |
| 874/ 1    | -24,69  | 10,93   | 108,34  | -13,48   |
| 874/ 2    | 66,01   | 98,93   | -5,64   | -93,83   |
| 874/ 9    | -0,02   | 0,05    | -0,02   | -0,07    |
| 874/ 10   | 0,30    | -0,11   | -0,47   | 0,26     |
| 874/ 11   | 0,80    | -0,69   | -1,10   | 1,19     |
| 874/ ELU+ | 86,22   | 172,03  | 142,03  | -153,49  |
| 874/ ELU- | 50,25   | 159,98  | 124,64  | -167,47  |
| 874/ ELS+ | 61,32   | 119,12  | 107,72  | -102,55  |
| 874/ ELS- | 25,34   | 107,06  | 90,33   | -116,53  |
| 875/ 1    | -25,86  | 7,83    | 91,88   | -13,05   |
| 875/ 2    | 58,72   | 129,94  | -43,28  | -139,18  |

|           |        |        |         |         |
|-----------|--------|--------|---------|---------|
| 875/ 9    | -0,03  | 0,05   | 0,13    | -0,08   |
| 875/ 10   | 0,29   | -0,15  | -0,56   | 0,37    |
| 875/ 11   | 0,76   | -0,97  | -1,02   | 1,69    |
| 875/ ELU+ | 73,54  | 210,55 | 83,72   | -219,58 |
| 875/ ELU- | 37,71  | 202,00 | 26,34   | -233,51 |
| 875/ ELS+ | 52,73  | 143,37 | 73,93   | -146,41 |
| 875/ ELS- | 16,90  | 134,82 | 16,55   | -160,34 |
| 876/ 1    | -21,63 | 6,10   | 82,53   | -11,87  |
| 876/ 2    | 44,66  | 166,16 | -100,53 | -182,44 |
| 876/ 9    | -0,03  | 0,06   | 0,31    | -0,10   |
| 876/ 10   | 0,24   | -0,24  | -0,80   | 0,47    |
| 876/ 11   | 0,59   | -1,37  | -1,27   | 2,16    |
| 876/ ELU+ | 54,67  | 260,06 | 12,50   | -281,85 |

| Noeud/Cas | FX [kN] | FY [kN] | FZ [kN] | MX [kNm] |
|-----------|---------|---------|---------|----------|
| 876/ ELU- | 24,56   | 253,28  | -97,41  | -294,85  |
| 876/ ELS+ | 39,51   | 175,61  | 34,76   | -187,75  |
| 876/ ELS- | 9,40    | 168,84  | -75,15  | -200,75  |
| 904/ 1    | -17,98  | -1,05   | 51,24   | 4,74     |
| 904/ 2    | 36,76   | -105,70 | -105,21 | 103,14   |
| 904/ 9    | -0,06   | -0,02   | 0,28    | 0,03     |
| 904/ 10   | -0,63   | 0,02    | 2,09    | 0,00     |
| 904/ 11   | -0,56   | -0,00   | 1,92    | 0,06     |
| 904/ ELU+ | 46,55   | -159,11 | -19,80  | 171,73   |
| 904/ ELU- | 0,66    | -162,38 | -137,40 | 158,81   |
| 904/ ELS+ | 35,09   | -105,89 | 12,72   | 118,45   |
| 904/ ELS- | -10,80  | -109,17 | -104,87 | 105,54   |
| 920/ 1    | -23,23  | -5,37   | 81,34   | 10,31    |
| 920/ 2    | 45,45   | -166,00 | -101,86 | 182,18   |
| 920/ 9    | -0,03   | -0,04   | 0,33    | 0,07     |
| 920/ 10   | -0,65   | -0,04   | 2,33    | 0,03     |
| 920/ 11   | -0,55   | -0,01   | 2,23    | 0,11     |
| 920/ ELU+ | 54,29   | -254,00 | 19,88   | 310,14   |
| 920/ ELU- | -14,50  | -268,15 | -93,78  | 282,66   |
| 920/ ELS+ | 40,31   | -169,07 | 39,90   | 215,33   |
| 920/ ELS- | -28,48  | -183,23 | -73,75  | 187,85   |
| 921/ 1    | -28,00  | -7,17   | 92,00   | 11,65    |
| 921/ 2    | 59,86   | -129,65 | -44,03  | 138,82   |
| 921/ 9    | -0,03   | -0,04   | 0,13    | 0,06     |
| 921/ 10   | -0,77   | -0,09   | 1,24    | 0,08     |

|           |        |         |        |        |
|-----------|--------|---------|--------|--------|
| 921/ 11   | -0,65  | 0,01    | 1,28   | 0,10   |
| 921/ ELU+ | 73,44  | -201,90 | 95,41  | 249,48 |
| 921/ ELU- | -18,92 | -219,80 | 33,75  | 219,68 |
| 921/ ELS+ | 54,03  | -134,51 | 83,89  | 175,88 |
| 921/ ELS- | -38,33 | -152,41 | 22,24  | 146,08 |
| 922/ 1    | -26,72 | -10,21  | 110,14 | 12,35  |
| 922/ 2    | 67,57  | -98,40  | -6,17  | 93,36  |
| 922/ 9    | -0,03  | -0,05   | -0,04  | 0,05   |
| 922/ 10   | -0,79  | -0,10   | 0,51   | 0,10   |
| 922/ 11   | -0,67  | -0,01   | 0,67   | 0,09   |
| 922/ ELU+ | 86,77  | -158,94 | 214,51 | 182,88 |
| 922/ ELU- | -10,13 | -182,68 | 133,15 | 153,14 |
| 922/ ELS+ | 63,08  | -106,10 | 178,48 | 131,75 |
| 922/ ELS- | -33,82 | -129,83 | 97,12  | 102,02 |
| 923/ 1    | -19,32 | -12,59  | 125,87 | 10,34  |
| 923/ 2    | 65,29  | -54,25  | 49,47  | 48,10  |
| 923/ 9    | -0,03  | -0,04   | -0,22  | 0,03   |
| 923/ 10   | -0,76  | -0,12   | -0,19  | 0,11   |
| 923/ 11   | -0,69  | -0,05   | 0,18   | 0,10   |

| Noeud/Cas       | FX [kN]     | FY [kN]     | FZ [kN]   | MX [kNm]  |
|-----------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| 923/ ELU+       | 89,96       | -96,66      | 373,64    | 106,34    |
| 923/ ELU-       | 9,39        | -121,60     | 231,28    | 84,14     |
| 923/ ELS+       | 64,81       | -65,02      | 304,97    | 78,55     |
| 923/ ELS-       | -15,75      | -89,97      | 162,61    | 56,35     |
|                 |             |             |           |           |
| Cas 1           | G           |             |           |           |
| Somme totale    | -0,00       | 0,00        | 10071,84  | -11,24    |
| Somme réactions | -0,00       | 0,00        | 10071,84  | 48435,59  |
| Somme efforts   | 0,0         | 0,0         | -10071,84 | -48435,59 |
| Vérification    | -0,00       | 0,00        | -0,00     | 0,00      |
| Précision       | 4,16830e-06 | 2,73915e-21 |           |           |
|                 |             |             |           |           |
| Cas 2           | Q           |             |           |           |
| Somme totale    | -0,00       | 0,00        | 1235,00   | -0,15     |
| Somme réactions | -0,00       | 0,00        | 1235,00   | 5866,25   |
| Somme efforts   | -0,00       | -0,00       | -1235,00  | -5866,25  |
| Vérification    | -0,00       | 0,00        | -0,00     | -0,00     |
| Précision       | 2,43322e-07 | 1,03657e-17 |           |           |

|                 |                     |                     |           |           |
|-----------------|---------------------|---------------------|-----------|-----------|
|                 |                     |                     |           |           |
| Cas 9           | Vent X+ 21,91 m/    | (f=1.00) Simulation |           |           |
| Somme totale    | -10,19              | 0,28                | -14,06    | -0,28     |
| Somme réactions | -10,19              | 0,28                | -14,06    | -68,43    |
| Somme efforts   | 10,19               | -0,28               | 14,06     | 68,43     |
| Vérification    | -0,00               | 0,00                | 0,00      | -0,00     |
| Précision       | 5,99052e-07         | 4,96287e-15         |           |           |
|                 |                     |                     |           |           |
| Cas 10          | Vent X+Y+ 21,91 m/s | (f=1.00) Simulation |           |           |
| Somme totale    | -7,35               | -29,63              | -13,98    | 29,98     |
| Somme réactions | -7,35               | -29,63              | -13,98    | 85,64     |
| Somme efforts   | 7,35                | 29,63               | 13,98     | -85,64    |
| Vérification    | 0,00                | -0,00               | 0,00      | -0,00     |
| Précision       | 7,45769e-07         | 3,19259e-15         |           |           |
|                 |                     |                     |           |           |
| Cas 11          |                     |                     |           |           |
|                 | Vent Y+ 21,91 m/    | (f=1.00) Simulation |           |           |
| Somme totale    | 0,24                | -35,08              | -59,96    | 33,79     |
| Somme réactions | 0,24                | -35,08              | -59,96    | -42,67    |
| Somme efforts   | -0,24               | 35,08               | 59,96     | 42,67     |
| Vérification    | 0,00                | -0,00               | 0,00      | -0,00     |
| Précision       | 7,74569e-07         | 4,33847e-16         |           |           |
|                 |                     |                     |           |           |
| Cas ELU+        |                     |                     |           |           |
|                 | ELU+                |                     |           |           |
| Somme totale    | 2373,45             | 287,63              | 22878,51  | 474,44    |
| Somme réactions | -25,95              | -96,64              | 16217,48  | 80269,23  |
| Somme efforts   | 25,95               | 96,64               | -16217,48 | -80269,23 |

| Noeud/Cas    | FX [kN]     | FY [kN]     | FZ [kN]  | MX [kNm] |
|--------------|-------------|-------------|----------|----------|
| Vérification | -0,00       | 0,00        | -0,00    | -0,00    |
| Précision    | 1,99342e-05 | 1,54721e-14 |          |          |
|              |             |             |          |          |
| Cas ELU-     | ELU-        |             |          |          |
| Somme totale | -2421,01    | -563,69     | 14084,03 | -270,06  |

| Somme réactions | -25,95      | -96,64      | 16217,48  | 80269,23  |
|-----------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| Somme efforts   | 25,95       | 96,64       | -16217,48 | -80269,23 |
| Vérification    | -0,00       | 0,00        | -0,00     | -0,00     |
| Précision       | 1,99342e-05 | 1,54721e-14 |           |           |
|                 |             |             |           |           |
| Cas ELS+        | ELS+        |             |           |           |
| Somme totale    | 2382,10     | 319,84      | 18779,87  | 446,70    |
| Somme réactions | -17,30      | -64,43      | 12118,84  | 60396,38  |
| Somme efforts   | 17,30       | 64,43       | -12118,84 | -60396,38 |
| Vérification    | -0,00       | 0,00        | -0,00     | -0,00     |
| Précision       | 1,72940e-05 | 1,11723e-14 |           |           |
|                 |             |             |           |           |
| Cas ELS-        | ELS-        |             |           |           |
| Somme totale    | -2412,36    | -531,48     | 9985,38   | -297,80   |
| Somme réactions | -17,30      | -64,43      | 12118,84  | 60396,38  |
| Somme efforts   | 17,30       | 64,43       | -12118,84 | -60396,38 |
| Vérification    | -0,00       | 0,00        | -0,00     | -0,00     |
| Précision       | 1,72940e-05 | 1,11723e-14 |           |           |
|                 |             |             |           |           |
| Noeud/Cas       | MY [kNm]    | MZ [kNm]    |           |           |
| 1/ 1            | -11,48      | 0,10        |           |           |
| 1/ 2            | -0,79       | 0,01        |           |           |
| 1/ 9            | 0,09        | 0,00        |           |           |
| 1/ 10           | -0,37       | -0,08       |           |           |
| 1/ 11           | -0,42       | -0,09       |           |           |
| 1/ ELU+         | 178,55      | 0,82        |           |           |
| 1/ ELU-         | -217,01     | -1,05       |           |           |
| 1/ ELS+         | 183,32      | 0,86        |           |           |
| 1/ ELS-         | -212,24     | -1,00       |           |           |
| 3/ 1            | -10,88      | 0,10        |           |           |
| 3/ 2            | -0,84       | 0,01        |           |           |
| 3/ 9            | 0,05        | 0,00        |           |           |
| 3/ 10           | -0,08       | -0,07       |           |           |
| 3/ 11           | 0,06        | -0,09       |           |           |
| 3/ ELU+         | 464,25      | 0,79        |           |           |
| 3/ ELU-         | -484,75     | -0,96       |           |           |
| 3/ ELS+         | 468,46      | 0,83        |           |           |
| 3/ ELS-         | -480,54     | -0,92       |           |           |

| Noeud/Cas |      | MY [kNm] | MZ [kNm] |
|-----------|------|----------|----------|
| 5/        | 1    | -10,43   | 0,10     |
| 5/        | 2    | -0,95    | 0,01     |
| 5/        | 9    | -0,02    | 0,00     |
| 5/        | 10   | 0,24     | -0,08    |
| 5/        | 11   | 0,48     | -0,09    |
| 5/        | ELU+ | 693,68   | 0,82     |
| 5/        | ELU- | -697,89  | -1,07    |
| 5/        | ELS+ | 697,45   | 0,87     |
| 5/        | ELS- | -694,12  | -1,02    |
| 7/        | 1    | 11,46    | -0,11    |
| 7/        | 2    | 0,79     | -0,01    |
| 7/        | 9    | -0,80    | -0,00    |
| 7/        | 10   | 0,15     | 0,08     |
| 7/        | 11   | 0,10     | 0,10     |
| 7/        | ELU+ | 215,23   | 1,05     |
| 7/        | ELU- | -180,38  | -0,81    |
| 7/        | ELS+ | 211,10   | 1,01     |
| 7/        | ELS- | -184,51  | -0,85    |
| 9/        | 1    | 10,81    | -0,10    |
| 9/        | 2    | 0,81     | -0,01    |
| 9/        | 9    | -0,70    | -0,00    |
| 9/        | 10   | -0,11    | 0,08     |
| 9/        | 11   | -0,13    | 0,09     |
| 9/        | ELU+ | 483,24   | 0,97     |
| 9/        | ELU- | -463,20  | -0,78    |
| 9/        | ELS+ | 479,52   | 0,93     |
| 9/        | ELS- | -466,92  | -0,82    |
| 11/       | 1    | 10,47    | -0,10    |
| 11/       | 2    | 0,97     | -0,01    |
| 11/       | 9    | -0,70    | -0,00    |
| 11/       | 10   | -0,39    | 0,08     |
| 11/       | 11   | -0,44    | 0,10     |
| 11/       | ELU+ | 697,79   | 1,06     |
| 11/       | ELU- | -691,83  | -0,78    |
| 11/       | ELS+ | 694,40   | 1,01     |
| 11/       | ELS- | -695,21  | -0,83    |
| 100/      | 1    | 14,53    | -2,62    |
| 100/      | 2    | -5,19    | -1,39    |
| 100/      | 9    | -0,03    | -0,02    |
| 100/      | 10   | -0,17    | 0,04     |

|           |       |       |
|-----------|-------|-------|
| 100/ 11   | -0,27 | 0,09  |
| 100/ ELU+ | 16,49 | -4,83 |
| 100/ ELU- | 9,66  | -7,99 |
| 100/ ELS+ | 14,23 | -3,28 |

| Noeud/Cas | MY [kNm] | MZ [kNm] |
|-----------|----------|----------|
| 100/ ELS- | 7,41     | -6,43    |
| 102/ 1    | 17,76    | -3,47    |
| 102/ 2    | -33,67   | 3,99     |
| 102/ 9    | -0,14    | 0,02     |
| 102/ 10   | -0,21    | 0,02     |
| 102/ 11   | -0,37    | 0,05     |
| 102/ ELU+ | -9,17    | 1,93     |
| 102/ ELU- | -33,49   | -2,54    |
| 102/ ELS+ | 1,82     | 1,10     |
| 102/ ELS- | -22,50   | -3,37    |
| 103/ 1    | 35,40    | -3,80    |
| 103/ 2    | -53,70   | 5,41     |
| 103/ 9    | -0,28    | 0,04     |
| 103/ 10   | -0,29    | 0,02     |
| 103/ 11   | -0,57    | 0,03     |
| 103/ ELU+ | 6,01     | 3,79     |
| 103/ ELU- | -43,03   | -1,96    |
| 103/ ELS+ | 21,04    | 2,37     |
| 103/ ELS- | -28,00   | -3,39    |
| 104/ 1    | 50,37    | -3,34    |
| 104/ 2    | -72,56   | 5,33     |
| 104/ 9    | -0,46    | 0,05     |
| 104/ 10   | -0,34    | 0,01     |
| 104/ 11   | -0,63    | 0,01     |
| 104/ ELU+ | 20,69    | 4,29     |
| 104/ ELU- | -54,40   | -1,90    |
| 104/ ELS+ | 40,05    | 2,76     |
| 104/ ELS- | -35,04   | -3,44    |
| 105/ 1    | 59,57    | -2,58    |
| 105/ 2    | -84,24   | 4,83     |
| 105/ 9    | -0,60    | 0,04     |
| 105/ 10   | -0,33    | 0,00     |
| 105/ 11   | -0,60    | -0,00    |
| 105/ ELU+ | 35,29    | 4,46     |

|      |      |        |       |
|------|------|--------|-------|
| 105/ | ELU- | -61,95 | -1,59 |
| 105/ | ELS+ | 57,32  | 2,93  |
| 105/ | ELS- | -39,92 | -3,12 |
| 106/ | 1    | 62,24  | -1,65 |
| 106/ | 2    | -88,02 | 4,18  |
| 106/ | 9    | -0,65  | 0,02  |
| 106/ | 10   | -0,28  | -0,01 |
| 106/ | 11   | -0,51  | -0,01 |
| 106/ | ELU+ | 46,49  | 4,56  |
| 106/ | ELU- | -65,17 | -0,60 |

| Noeud/Cas | MY [kNm] | MZ [kNm] |
|-----------|----------|----------|
| 106/ ELS+ | 69,44    | 3,04     |
| 106/ ELS- | -42,23   | -2,11    |
| 115/ 1    | 58,51    | -0,53    |
| 115/ 2    | -83,97   | 3,15     |
| 115/ 9    | -0,60    | 0,01     |
| 115/ 10   | -0,18    | -0,02    |
| 115/ 11   | -0,39    | -0,01    |
| 115/ ELU+ | 51,06    | 4,26     |
| 115/ ELU- | -63,75   | 1,08     |
| 115/ ELS+ | 73,15    | 2,89     |
| 115/ ELS- | -41,66   | -0,30    |
| 116/ 1    | 48,74    | 0,88     |
| 116/ 2    | -72,00   | 1,42     |
| 116/ 9    | -0,46    | -0,02    |
| 116/ 10   | -0,04    | -0,03    |
| 116/ 11   | -0,26    | -0,02    |
| 116/ ELU+ | 46,85    | 3,27     |
| 116/ ELU- | -56,96   | 3,18     |
| 116/ ELS+ | 66,17    | 2,28     |
| 116/ ELS- | -37,64   | 2,20     |
| 117/ 1    | 34,05    | 2,38     |
| 117/ 2    | -52,73   | -0,96    |
| 117/ 9    | -0,27    | -0,03    |
| 117/ 10   | 0,08     | -0,03    |
| 117/ 11   | -0,13    | -0,02    |
| 117/ ELU+ | 34,33    | 5,10     |
| 117/ ELU- | -44,57   | 1,31     |
| 117/ ELS+ | 48,94    | 4,79     |

|      |      |        |       |
|------|------|--------|-------|
| 117/ | ELS- | -29,96 | 1,00  |
| 118/ | 1    | 16,88  | 3,11  |
| 118/ | 2    | -31,36 | -3,30 |
| 118/ | 9    | -0,13  | -0,02 |
| 118/ | 10   | 0,09   | -0,01 |
| 118/ | 11   | -0,00  | -0,03 |
| 118/ | ELU+ | 13,03  | 4,46  |
| 118/ | ELU- | -31,87 | -1,25 |
| 118/ | ELS+ | 22,82  | 5,06  |
| 118/ | ELS- | -22,08 | -0,65 |
| 121/ | 1    | 14,03  | 1,88  |
| 121/ | 2    | -2,82  | 2,07  |
| 121/ | 9    | -0,02  | 0,02  |
| 121/ | 10   | 0,17   | 0,06  |
| 121/ | 11   | 0,05   | 0,00  |
| 121/ | ELU+ | 35,87  | 9,88  |

| Noeud/Cas | MY [kNm] | MZ [kNm] |
|-----------|----------|----------|
| 121/ ELU- | 13,60    | 5,07     |
| 121/ ELS+ | 32,27    | 8,15     |
| 121/ ELS- | 10,00    | 3,34     |
| 177/ 1    | -14,53   | 2,62     |
| 177/ 2    | 5,19     | 1,39     |
| 177/ 9    | 0,01     | 0,01     |
| 177/ 10   | 0,08     | -0,01    |
| 177/ 11   | 0,29     | -0,09    |
| 177/ ELU+ | -9,82    | 8,01     |
| 177/ ELU- | -16,65   | 4,86     |
| 177/ ELS+ | -7,51    | 6,45     |
| 177/ ELS- | -14,34   | 3,30     |
| 179/ 1    | -17,76   | 3,47     |
| 179/ 2    | 33,67    | -3,99    |
| 179/ 9    | -0,03    | 0,00     |
| 179/ 10   | 0,04     | 0,00     |
| 179/ 11   | 0,41     | -0,06    |
| 179/ ELU+ | 33,05    | 2,60     |
| 179/ ELU- | 8,78     | -1,87    |
| 179/ ELS+ | 22,22    | 3,41     |
| 179/ ELS- | -2,05    | -1,06    |
| 180/ 1    | -35,40   | 3,80     |

|      |      |        |       |
|------|------|--------|-------|
| 180/ | 2    | 53,70  | -5,41 |
| 180/ | 9    | -0,03  | 0,00  |
| 180/ | 10   | 0,01   | 0,01  |
| 180/ | 11   | 0,62   | -0,03 |
| 180/ | ELU+ | 42,18  | 2,06  |
| 180/ | ELU- | -6,84  | -3,69 |
| 180/ | ELS+ | 27,42  | 3,45  |
| 180/ | ELS- | -21,60 | -2,30 |
| 181/ | 1    | -50,38 | 3,34  |
| 181/ | 2    | 72,56  | -5,34 |
| 181/ | 9    | -0,02  | 0,00  |
| 181/ | 10   | -0,04  | 0,01  |
| 181/ | 11   | 0,69   | -0,01 |
| 181/ | ELU+ | 53,16  | 2,01  |
| 181/ | ELU- | -21,79 | -4,19 |
| 181/ | ELS+ | 34,20  | 3,50  |
| 181/ | ELS- | -40,75 | -2,69 |
| 182/ | 1    | -59,58 | 2,58  |
| 182/ | 2    | 84,24  | -4,83 |
| 182/ | 9    | -0,02  | 0,00  |
| 182/ | 10   | -0,09  | 0,01  |
| 182/ | 11   | 0,65   | 0,00  |

| Noeud/Cas | MY [kNm] | MZ [kNm] |
|-----------|----------|----------|
| 182/ ELU+ | 60,44    | 1,68     |
| 182/ ELU- | -36,67   | -4,38    |
| 182/ ELS+ | 38,90    | 3,19     |
| 182/ ELS- | -58,21   | -2,87    |
| 183/ 1    | -62,25   | 1,66     |
| 183/ 2    | 88,02    | -4,18    |
| 183/ 9    | -0,02    | 0,00     |
| 183/ 10   | -0,12    | 0,01     |
| 183/ 11   | 0,54     | 0,01     |
| 183/ ELU+ | 63,59    | 0,66     |
| 183/ ELU- | -48,05   | -4,50    |
| 183/ ELS+ | 41,16    | 2,16     |
| 183/ ELS- | -70,48   | -3,01    |
| 192/ 1    | -58,52   | 0,53     |
| 192/ 2    | 83,97    | -3,15    |
| 192/ 9    | -0,02    | 0,01     |

|      |      |        |       |
|------|------|--------|-------|
| 192/ | 10   | -0,14  | 0,01  |
| 192/ | 11   | 0,41   | 0,02  |
| 192/ | ELU+ | 62,32  | -1,07 |
| 192/ | ELU- | -52,52 | -4,25 |
| 192/ | ELS+ | 40,70  | 0,31  |
| 192/ | ELS- | -74,14 | -2,88 |
| 193/ | 1    | -48,76 | -0,88 |
| 193/ | 2    | 72,00  | -1,42 |
| 193/ | 9    | -0,03  | 0,01  |
| 193/ | 10   | -0,15  | 0,01  |
| 193/ | 11   | 0,27   | 0,02  |
| 193/ | ELU+ | 55,90  | -3,23 |
| 193/ | ELU- | -47,93 | -3,31 |
| 193/ | ELS+ | 36,92  | -2,23 |
| 193/ | ELS- | -66,90 | -2,31 |
| 194/ | 1    | -34,06 | -2,38 |
| 194/ | 2    | 52,73  | 0,96  |
| 194/ | 9    | -0,04  | 0,01  |
| 194/ | 10   | -0,15  | 0,01  |
| 194/ | 11   | 0,13   | 0,02  |
| 194/ | ELU+ | 43,93  | -1,39 |
| 194/ | ELU- | -34,87 | -5,19 |
| 194/ | ELS+ | 29,52  | -1,05 |
| 194/ | ELS- | -49,28 | -4,85 |
| 195/ | 1    | -16,88 | -3,11 |
| 195/ | 2    | 31,36  | 3,30  |
| 195/ | 9    | -0,03  | 0,00  |
| 195/ | 10   | -0,15  | 0,01  |

| Noeud/Cas | MY [kNm] | MZ [kNm] |
|-----------|----------|----------|
| 195/ 11   | -0,00    | 0,03     |
| 195/ ELU+ | 31,49    | 1,21     |
| 195/ ELU- | -13,37   | -4,53    |
| 195/ ELS+ | 21,82    | 0,63     |
| 195/ ELS- | -23,04   | -5,11    |
| 198/ 1    | -14,03   | -1,88    |
| 198/ 2    | 2,82     | -2,07    |
| 198/ 9    | 0,01     | -0,01    |
| 198/ 10   | -0,06    | -0,02    |
| 198/ 11   | -0,06    | -0,00    |

|      |      |        |        |
|------|------|--------|--------|
| 198/ | ELU+ | -13,47 | -4,99  |
| 198/ | ELU- | -35,69 | -9,79  |
| 198/ | ELS+ | -9,91  | -3,28  |
| 198/ | ELS- | -32,14 | -8,08  |
| 779/ | 1    | -5,05  | 0,82   |
| 779/ | 2    | 10,11  | 10,41  |
| 779/ | 9    | 0,09   | 0,10   |
| 779/ | 10   | 0,14   | -0,07  |
| 779/ | 11   | 0,10   | -0,13  |
| 779/ | ELU+ | 14,01  | 17,21  |
| 779/ | ELU- | 3,69   | 16,32  |
| 779/ | ELS+ | 10,56  | 11,77  |
| 779/ | ELS- | 0,23   | 10,87  |
| 789/ | 1    | -0,06  | -0,79  |
| 789/ | 2    | -6,98  | -7,70  |
| 789/ | 9    | -0,04  | -0,06  |
| 789/ | 10   | -0,04  | 0,03   |
| 789/ | 11   | -0,02  | 0,08   |
| 789/ | ELU+ | -8,23  | -12,30 |
| 789/ | ELU- | -13,14 | -13,48 |
| 789/ | ELS+ | -4,67  | -8,20  |
| 789/ | ELS- | -9,59  | -9,38  |
| 790/ | 1    | -0,97  | -0,03  |
| 790/ | 2    | -3,56  | -8,11  |
| 790/ | 9    | -0,02  | -0,09  |
| 790/ | 10   | -0,04  | 0,04   |
| 790/ | 11   | -0,01  | 0,09   |
| 790/ | ELU+ | -4,87  | -12,01 |
| 790/ | ELU- | -8,61  | -12,26 |
| 790/ | ELS+ | -2,72  | -7,97  |
| 790/ | ELS- | -6,46  | -8,21  |
| 791/ | 1    | -0,84  | 0,20   |
| 791/ | 2    | -3,57  | -7,68  |
| 791/ | 9    | -0,03  | -0,10  |

| Noeud/Cas | MY [kNm] | MZ [kNm] |
|-----------|----------|----------|
| 791/ 10   | -0,04    | 0,05     |
| 791/ 11   | -0,01    | 0,08     |
| 791/ ELU+ | -4,69    | -10,93   |
| 791/ ELU- | -8,85    | -11,27   |

|      |      |        |        |
|------|------|--------|--------|
| 791/ | ELS+ | -2,57  | -7,17  |
| 791/ | ELS- | -6,73  | -7,52  |
| 792/ | 1    | 0,53   | 0,22   |
| 792/ | 2    | -6,45  | -7,42  |
| 792/ | 9    | -0,05  | -0,09  |
| 792/ | 10   | -0,08  | 0,04   |
| 792/ | 11   | -0,04  | 0,08   |
| 792/ | ELU+ | -6,19  | -10,57 |
| 792/ | ELU- | -12,28 | -10,84 |
| 792/ | ELS+ | -3,06  | -6,95  |
| 792/ | ELS- | -9,15  | -7,22  |
| 820/ | 1    | -4,96  | -0,72  |
| 820/ | 2    | 10,34  | -10,39 |
| 820/ | 9    | 0,10   | -0,10  |
| 820/ | 10   | -0,01  | -0,15  |
| 820/ | 11   | -0,20  | -0,01  |
| 820/ | ELU+ | 14,34  | -16,62 |
| 820/ | ELU- | 2,86   | -18,53 |
| 820/ | ELS+ | 10,96  | -11,04 |
| 820/ | ELS- | -0,51  | -12,95 |
| 836/ | 1    | 0,36   | -0,24  |
| 836/ | 2    | -6,32  | 7,44   |
| 836/ | 9    | -0,05  | 0,09   |
| 836/ | 10   | 0,01   | 0,13   |
| 836/ | 11   | 0,12   | 0,00   |
| 836/ | ELU+ | -6,28  | 11,21  |
| 836/ | ELU- | -12,61 | 10,67  |
| 836/ | ELS+ | -3,28  | 7,46   |
| 836/ | ELS- | -9,61  | 6,92   |
| 837/ | 1    | -1,14  | -0,23  |
| 837/ | 2    | -3,36  | 7,70   |
| 837/ | 9    | -0,02  | 0,09   |
| 837/ | 10   | 0,01   | 0,13   |
| 837/ | 11   | 0,07   | 0,00   |
| 837/ | ELU+ | -4,89  | 11,65  |
| 837/ | ELU- | -11,73 | 11,15  |
| 837/ | ELS+ | -2,84  | 7,76   |
| 837/ | ELS- | -9,68  | 7,27   |
| 838/ | 1    | -1,29  | -0,03  |
| 838/ | 2    | -3,26  | 8,12   |

| Noeud/Cas | MY [kNm] | MZ [kNm] |
|-----------|----------|----------|
| 838/ 9    | -0,02    | 0,09     |
| 838/ 10   | 0,01     | 0,11     |
| 838/ 11   | 0,06     | -0,00    |
| 838/ ELU+ | -4,99    | 12,70    |
| 838/ ELU- | -11,59   | 12,24    |
| 838/ ELS+ | -2,93    | 8,55     |
| 838/ ELS- | -9,53    | 8,10     |
| 839/ 1    | -0,28    | 0,66     |
| 839/ 2    | -6,59    | 7,65     |
| 839/ 9    | -0,04    | 0,06     |
| 839/ 10   | -0,01    | 0,08     |
| 839/ 11   | 0,06     | -0,01    |
| 839/ ELU+ | -7,11    | 14,44    |
| 839/ ELU- | -13,59   | 12,19    |
| 839/ ELS+ | -3,72    | 10,31    |
| 839/ ELS- | -10,20   | 8,07     |
| 863/ 1    | 5,05     | -0,82    |
| 863/ 2    | -10,11   | -10,41   |
| 863/ 9    | 0,03     | -0,01    |
| 863/ 10   | -0,07    | 0,03     |
| 863/ 11   | -0,11    | 0,13     |
| 863/ ELU+ | -3,37    | -16,23   |
| 863/ ELU- | -13,74   | -17,13   |
| 863/ ELS+ | -0,00    | -10,81   |
| 863/ ELS- | -10,37   | -11,71   |
| 873/ 1    | 0,06     | 0,79     |
| 873/ 2    | 6,98     | 7,70     |
| 873/ 9    | -0,02    | 0,01     |
| 873/ 10   | 0,01     | -0,01    |
| 873/ 11   | 0,03     | -0,08    |
| 873/ ELU+ | 13,03    | 13,42    |
| 873/ ELU- | 8,09     | 12,24    |
| 873/ ELS+ | 9,52     | 9,34     |
| 873/ ELS- | 4,57     | 8,16     |
| 874/ 1    | 0,97     | 0,03     |
| 874/ 2    | 3,56     | 8,11     |
| 874/ 9    | -0,02    | 0,00     |
| 874/ 10   | 0,01     | -0,02    |
| 874/ 11   | 0,01     | -0,09    |
| 874/ ELU+ | 8,50     | 12,17    |

|      |      |      |       |
|------|------|------|-------|
| 874/ | ELU- | 4,77 | 11,92 |
| 874/ | ELS+ | 6,38 | 8,15  |
| 874/ | ELS- | 2,64 | 7,90  |
| 875/ | 1    | 0,85 | -0,20 |

| Noeud/Cas | MY [kNm] | MZ [kNm] |
|-----------|----------|----------|
| 875/ 2    | 3,57     | 7,68     |
| 875/ 9    | -0,02    | 0,00     |
| 875/ 10   | 0,02     | -0,02    |
| 875/ 11   | 0,01     | -0,08    |
| 875/ ELU+ | 8,73     | 11,18    |
| 875/ ELU- | 4,57     | 10,83    |
| 875/ ELS+ | 6,64     | 7,46     |
| 875/ ELS- | 2,48     | 7,11     |
| 876/ 1    | -0,53    | -0,22    |
| 876/ 2    | 6,45     | 7,42     |
| 876/ 9    | -0,02    | 0,00     |
| 876/ 10   | 0,03     | -0,02    |
| 876/ 11   | 0,05     | -0,08    |
| 876/ ELU+ | 12,11    | 10,74    |
| 876/ ELU- | 5,99     | 10,47    |
| 876/ ELS+ | 9,04     | 7,15     |
| 876/ ELS- | 2,92     | 6,88     |
| 904/ 1    | 4,96     | 0,72     |
| 904/ 2    | -10,34   | 10,39    |
| 904/ 9    | 0,03     | 0,00     |
| 904/ 10   | 0,22     | 0,00     |
| 904/ 11   | 0,20     | 0,01     |
| 904/ ELU+ | -2,33    | 18,17    |
| 904/ ELU- | -13,84   | 16,26    |
| 904/ ELS+ | 0,88     | 12,72    |
| 904/ ELS- | -10,64   | 10,81    |
| 920/ 1    | -0,35    | 0,24     |
| 920/ 2    | 6,32     | -7,44    |
| 920/ 9    | -0,02    | -0,00    |
| 920/ 10   | -0,12    | 0,01     |
| 920/ 11   | -0,11    | -0,00    |
| 920/ ELU+ | 12,28    | -10,33   |
| 920/ ELU- | 5,97     | -10,87   |
| 920/ ELS+ | 9,37     | -6,69    |

|           |       |        |
|-----------|-------|--------|
| 920/ ELS- | 3,06  | -7,24  |
| 921/ 1    | 1,14  | 0,23   |
| 921/ 2    | 3,36  | -7,70  |
| 921/ 9    | -0,02 | -0,00  |
| 921/ 10   | -0,07 | 0,01   |
| 921/ 11   | -0,07 | -0,00  |
| 921/ ELU+ | 11,57 | -10,81 |
| 921/ ELU- | 4,72  | -11,31 |
| 921/ ELS+ | 9,57  | -7,04  |
| 921/ ELS- | 2,72  | -7,54  |

| Noeud/Cas       | MY [kNm]   | MZ [kNm] |
|-----------------|------------|----------|
| 922/ 1          | 1,29       | 0,03     |
| 922/ 2          | 3,26       | -8,12    |
| 922/ 9          | -0,02      | -0,00    |
| 922/ 10         | -0,07      | 0,00     |
| 922/ 11         | -0,06      | -0,00    |
| 922/ ELU+       | 11,42      | -11,97   |
| 922/ ELU-       | 4,82       | -12,41   |
| 922/ ELS+       | 9,41       | -7,92    |
| 922/ ELS-       | 2,82       | -8,36    |
| 923/ 1          | 0,28       | -0,66    |
| 923/ 2          | 6,59       | -7,65    |
| 923/ 9          | -0,02      | -0,01    |
| 923/ 10         | -0,08      | -0,00    |
| 923/ 11         | -0,06      | 0,01     |
| 923/ ELU+       | 13,22      | -11,99   |
| 923/ ELU-       | 6,87       | -14,24   |
| 923/ ELS+       | 9,90       | -7,93    |
| 923/ ELS-       | 3,56       | -10,18   |
|                 |            |          |
| Cas 1           | G          |          |
| Somme totale    | -0,11      | -0,00    |
| Somme réactions | -312227,19 | 0,00     |
| Somme efforts   | 312227,19  | 0,0      |
| Vérification    | -0,00      | 0,00     |
| Précision       |            |          |
|                 |            |          |
| Cas 2           | Q          |          |
| Somme totale    | 0,00       | 0,00     |
| Somme réactions | -38285,00  | -0,00    |

|                 |                  |                   |
|-----------------|------------------|-------------------|
| Somme efforts   | 38285,00         | -0,00             |
| Vérification    | -0,00            | -0,00             |
| Précision       |                  |                   |
|                 |                  |                   |
| Cas 9           | Vent X+ 21,91 m/ | (f=1.00) Simulat  |
| Somme totale    | -6,11            | 0,13              |
| Somme réactions | 344,43           | 60,03             |
| Somme efforts   | -344,43          | -60,03            |
| Vérification    | 0,00             | -0,00             |
| Précision       |                  |                   |
|                 |                  |                   |
| Cas 10          | Vent X+Y+ 21,91  | n/s (f=1.00) Simu |
| Somme totale    | -3,02            | 0,50              |
| Somme réactions | 386,05           | -618,38           |
| Somme efforts   | -386,05          | 618,38            |

| Noeud/Cas       | MY [kNm]         | MZ [kNm]         |
|-----------------|------------------|------------------|
| Vérification    | 0,00             | -0,00            |
| Précision       |                  |                  |
|                 |                  |                  |
| Cas 11          | Vent Y+ 21,91 m/ | (f=1.00) Simulat |
| Somme totale    | -0,08            | -0,00            |
| Somme réactions | 1875,91          | -1085,49         |
| Somme efforts   | -1875,91         | 1085,49          |
| Vérification    | 0,00             | -0,00            |
| Précision       |                  |                  |
|                 |                  |                  |
| Cas ELU+        | ELU+             |                  |
| Somme totale    | 3518,73          | 63,37            |
| Somme réactions | -525424,63       | -2465,77         |
| Somme efforts   | 525424,63        | 2465,77          |
| Vérification    | -0,00            | 0,00             |
| Précision       |                  |                  |
|                 |                  |                  |
| Cas ELU-        | ELU-             |                  |

|                 |            |          |
|-----------------|------------|----------|
| Somme totale    | -3540,21   | -61,49   |
| Somme réactions | -525424,63 | -2465,77 |
| Somme efforts   | 525424,63  | 2465,77  |
| Vérification    | -0,00      | 0,00     |
| Précision       |            |          |
|                 |            |          |
| Cas ELS+        | ELS+       |          |
| Somme totale    | 3523,37    | 63,06    |
| Somme réactions | -398305,80 | -1643,84 |
| Somme efforts   | 398305,80  | 1643,84  |
| Vérification    | -0,00      | 0,00     |
| Précision       |            |          |
|                 |            |          |
| Cas ELS-        | ELS-       |          |
| Somme totale    | -3535,57   | -61,81   |
| Somme réactions | -398305,80 | -1643,84 |
| Somme efforts   | 398305,80  | 1643,84  |
| Vérification    | -0,00      | 0,00     |
| Précision       |            |          |