

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Aboubekr Belkaid Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme
de Master en Génie Civil
Option : Infrastructure de base et géotechnique - Travaux Publics

Thème :

**ETUDE D'UN PONT A POUTRES INDEPENDANTES EN BETON
PRECONTRAIT SUR OUED ESSAM
WILAYA DE NAAMA**

Présenté en Juin 2016 par :

OUSSADIT Dalila Nesma

HADJ SLIMANE Racim Ilyes

Devant le Jury composé de :

Mr : MISSOUM A.

Président

Mr : MAATALLAH M.

Examineur

Mr : BENAMAR A.

Examineur

Mr : CHERIF BENMOUSSA M.Y.

Encadreur

Remerciements

A notre directeur de mémoire, monsieur **CHERIF BENMOUSSA**.

Vous nous avez fait l'honneur de diriger ce travail avec beaucoup de disponibilité, de patience et de rigueur.

Nous avons été particulièrement sensibles à vos encouragements et à votre soutien.

A monsieur **MISSOUM**

Vous nous faites un grand honneur en acceptant la présidence du jury et nous sommes sensible à l'intérêt que vous témoigné pour notre travail.

Nous vous en remercions vivement.

A monsieur **MAATALLAH** et monsieur **BENAMAR**,

Nous sommes extrêmement honorés de vous compter parmi le jury que vous rehaussez par votre expérience et votre compétence.

Soyez assuré de notre respectueuse gratitude.

Dédicaces

Je remercie Dieu le tout puissant d'avoir éclairé mon chemin et de m'avoir donné le courage de réaliser ce mémoire.

Je dédie ce modeste travail ;

A mes chers parents qui m'ont toujours soutenu, qui m'ont guidé lors des moments difficiles et qui ont su m'aider avec leurs précieux conseils tout au long de mon parcours ;

A mon frère et ma soeur : Imene, Mehdi ;

A Amina et Chihab ;

A mes neveux : Rania et Elias ;

A toute ma famille ;

A tous mes amis qui m'ont soutenue et encouragée : Selma, Nardjess, Hamid, Yasser, Wissem, Zineb, Nesrine, Mehdi;

A toute la promotion IBG 2016 avec qui j'ai tissé des liens d'amitié au travers de ses années d'étude ensemble.

Oussadit Nesma

Dédicaces

A mes chers parents ;

Vous vous êtes dépensés pour moi sans compter, Vous m'avez
donné les moyens de réussir, Votre soutien m'est précieux.
Cette réussite est surtout la vôtre.
Avec toute ma tendresse.

A ma chère sœur

Meilleurs vœux de succès.

A ma grand-mère, oncles, tantes, cousins et cousines

Vous avez de près ou de loin contribués à ma formation.
Affectueuse reconnaissance.

A la mémoire de mon grand-père SELLADJI Abdallah

Un symbole pour nous, Allah yerahmek.

A toute ma famille

A mes amis ; Adel B., El Hadi B., Fawzi K., Fouzi B., Hassan G., Kamel B.,
Kemal S., Malik H., Mokhtar H., Nadir B., Nassim Z., Mehdi B., Mustafa T.,
Oussama K., Yassine B., Zaki S.

Et à leurs familles.

A la promotion IBG 2016

Plus que des camarades, de vrais Amis.
Meilleurs vœux de réussite.

Je dédie ce travail.

HADJ SLIMANE Racim Ilyes

Résumé

Ce mémoire concerne l'étude d'un pont routier à poutres en béton précontraint. L'ouvrage concerné est un pont situé au niveau du Chemin de Wilaya(CW) 03 qui relie la route nationale RN06 et le village AMAR passant par OUED ESSAM dans la wilaya de NAAMA, sa longueur totale est de l'ordre de 200m.

L'objectif de ce projet est de réaliser un ouvrage d'art qui traverse l'oued en remplacement d'un ouvrage jusqu'ici submersible. En effet, une étude détaillée a été effectuée sur le comportement des différents éléments composant ce pont suivant les multiples sollicitations : actions permanentes, actions dues aux surcharges de circulation et d'équipement, et les actions accidentelles de type sismiques.

Un traitement numérique de modélisation et d'analyse a été réalisé grâce au logiciel SAP2000v14.2, ensuite les résultats obtenus ont été traduits par des graphiques représentant les ferraillements adéquats des différents éléments composant la structure.

Mots clés :

Pont à poutres en béton précontraint, post tension, pieux, tablier, pile, culée, sollicitations.

Abstract

This memory proposes the study of a road bridge with prestressed concrete beams. The work concerned is a bridge located at the level of CW03 who connects the national road RN 06 and the village AMMAR passing by Oued ESSAM in the province of NAAMA., its total length is about 200 m.

The goal of this project is to realize a structure which crosses the Oued in replacing of a bridge up to now submersible. Indeed, a detailed study has been done on the behavior of the various elements composing this bridge according to the many stresses: permanent actions, actions due to the overloads of traffic and of attachment, and accidental actions of seismic type.

A digital processing of modeling and analysis has been executed by the software SAP2000v14.2, and then the results obtained were translated to graphs representing adequate reinforcements of the various elements composing the structure.

Key words:

Bridge with prestressed concrete beams, post tension, pile, deck, pier, abutment, stresses.

هذه الذاكرة تقترح دراسة جسر بخرسانة مسبقة لإجهاد يقع الجسر المعني على مستوى الطريق الولائي رقم 03 الرابط بين الطريق الوطني رقم 06 وقرية عمار يقطع وادي الصم في ولاية النعامة ويبلغ الطول الإجمالي 200 متر. الهدف من هذا المشروع إنشاء جسر يعبر الوادي ليحل محل جسر حتى الآن غاطس. وبهذا الصدد تمت دراسة دقيقة للعناصر التي يكون النفق حسب مختلف المؤثرات مؤثرات دائمة، مؤثرات ناتجة عن شحنات العربات ومؤثرات ناتجة عن الزلزال . تمت معالجة رقمية و تحليلية ببرنامج SAP2000v14.2. و أخيرا ،فإن النتائج المحصل عليها يتم ترجمتها إلى رسومات تمثل الحديد المقوية لمختلف العناصر المكونة للبناية .

الكلمات الرئيسية

جسر ذات روافد من الخرسانة المجهدة مسبقا، مابعد التوتر، الأساسات العميقة، الركيزة العمودية، الركيزة الجانبية.

Table des matières

| | |
|----------------------------|------|
| Remerciements | I |
| Dédicaces..... | II |
| Résumé | IV |
| Abstract..... | V |
| المخلص..... | VI |
| Table des matières | VII |
| Liste des figures..... | XIII |
| Liste des tableaux | XVI |
| Introduction générale..... | 1 |

Chapitre I : Présentation du projet

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 2 |
| 2. Présentation générale du projet | 2 |
| 2.1. Présentation de l'ouvrage..... | 2 |
| 2.2. Les données géotechniques | 3 |
| 2.2.1. Généralités..... | 3 |
| 2.2.2. Contexte géologique..... | 3 |
| 2.3. Les données fonctionnelles | 5 |
| 2.3.1. Tracé en plan..... | 5 |
| 2.3.2. Profil en long..... | 6 |
| 2.3.3. Profil en travers | 6 |
| 2.4. Choix de l'ouvrage..... | 7 |
| 3. Caractéristiques des matériaux | 8 |
| 3.1. Béton | 8 |
| 3.1.1. Résistance caractéristique à la compression | 8 |
| 3.1.2. Résistance caractéristiques à la traction | 8 |
| 3.1.3. Contrainte admissible..... | 8 |
| 3.1.4. Coefficient de poisson..... | 9 |
| 3.1.5. Déformation longitudinale du béton | 9 |
| 3.1.6. Déformation transversale du béton | 9 |
| 3.2. L'acier | 10 |
| 3.2.1. L'acier passif..... | 10 |
| 3.2.2. L'acier actif..... | 11 |

Table des matières

Chapitre II : Eude du tablier

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 13 |
| 2. Pré dimensionnement | 13 |
| 2.1. Longueur des travées..... | 13 |
| 2.2. Largeur des voies | 13 |
| 2.3. Hauteur des poutres..... | 13 |
| 2.4. Largeur de la table de compression..... | 14 |
| 2.5. Espacement des poutres | 14 |
| 2.6. Nombre de poutre..... | 14 |
| 2.7. Epaisseur de l'âme | 14 |
| 2.8. Epaisseur de la table de compression..... | 14 |
| 2.9. Largeur du talon | 14 |
| 2.10. Epaisseur du talon | 15 |
| 2.11. Gousset..... | 15 |
| 2.11.1. Largeur du gousset de la table de compression | 15 |
| 2.11.2. Largeur du gousset du talon..... | 15 |
| 2.12. Entretoise..... | 15 |
| 2.13. Epaisseur de la dalle..... | 16 |
| 2.14. Caractéristiques géométriques de la poutre..... | 16 |
| 2.14.1. Caractéristiques géométriques de la poutre médiane..... | 17 |
| 2.14.2. Caractéristiques géométriques de la poutre médiane + hourdis | 18 |
| 2.14.3. Caractéristiques géométriques de la poutre en travée..... | 19 |
| 2.14.4. Caractéristiques géométriques de la poutre + hourdis en travée | 20 |
| 2.14.5. Caractéristiques géométriques de la poutre à l'about | 21 |
| 2.14.6. Caractéristiques géométriques de la poutre + hourdis à l'about..... | 22 |
| 3. Charges et surcharges..... | 22 |
| 3.1. Introduction | 22 |
| 3.2. Calcul des charges permanentes..... | 22 |
| 3.3. Calcul des surcharges | 23 |
| 4. Détermination des moments et des efforts | 29 |
| 4.1. La méthode numérique (Sap2000)..... | 29 |
| 4.2. La modélisation..... | 29 |
| 4.3. Moments fléchissant dans les poutres | 31 |
| 4.3.1. Moments fléchissant due au poids propre(DEAD) | 31 |
| 4.3.2. Moments fléchissant due à la surcharge A(l)..... | 32 |
| 4.3.3. Valeur des Moments fléchissant réel | 34 |
| 4.3.4. Moments fléchissant à l'état limite ultime (ELU)..... | 35 |
| 4.3.5. Moments fléchissant à l'état limite de service (ELS) | 35 |
| 4.4. Efforts tranchants dans les poutres..... | 35 |
| 4.4.1. Efforts tranchants due au poids propre..... | 35 |
| 4.4.2. Efforts tranchants à l'état limite ultime (ELU) | 37 |
| 4.4.3. Efforts tranchants à l'état limite de service (ELS)..... | 38 |

Chapitre III : Etude de la précontrainte

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 39 |
| 2. Principe de la précontrainte | 39 |
| 3. Précontrainte par post tension | 39 |
| 4. Procédé de précontrainte par post tension | 39 |
| 5. Calcul de la précontrainte | 41 |
| 6. Calcul du nombre de câbles | 42 |
| 7. Vérification à l'ELS | 43 |
| 8. Disposition des câbles | 48 |
| 9. Calcul des pertes de précontraintes | 50 |
| 9.1. Pertes instantanées | 50 |
| 9.1.1. Pertes par frottements | 50 |
| 9.1.2. Pertes par recul d'ancrage | 51 |
| 9.1.3. Pertes par raccourcissement instantanée du béton | 52 |
| 9.1.4. Pertes instantanées totales | 53 |
| 9.2. Pertes différées | 53 |
| 9.2.1. Pertes dues au retrait du béton | 54 |
| 9.2.2. Pertes dues au fluage du béton | 54 |
| 9.2.3. Pertes dues à la relaxation des aciers | 54 |
| 9.2.4. Pertes de tensions différées totales | 55 |
| 9.3. Calcul du pourcentage des pertes totales | 56 |
| 10. Vérification à l'ELS des contraintes de la poutre la plus sollicitée | 56 |
| 11. Ferrailage de la poutre | 58 |
| 11.1. Armatures longitudinales | 58 |
| 11.2. Armatures de peau | 59 |
| 11.3. Armatures supérieures de la table de compression | 59 |
| 11.4. Effort tranchant maximum | 60 |
| 11.5. Effort de cisaillement dalle-poutre | 60 |

Chapitre IV : Etude de l'hourdis

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 62 |
| 2. Evaluation des sollicitations | 62 |
| 3. Etude des moments fléchissant | 62 |
| 4. Etude des efforts tranchants | 64 |
| 5. Calcul du ferrailage | 64 |
| 6. Résistance aux efforts tranchants | 68 |
| 7. Etude de l'entretoise | 68 |
| 7.1. Ferrailage entretoise | 69 |
| 7.2. Armatures de construction | 70 |

Table des matières

Chapitre V : Etude de l'appareil d'appui

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 71 |
| 1.1. Les appareils d'appuis en élastomère fretté | 71 |
| 2. Dimensionnement des appareils d'appuis | 71 |
| 2.1. Variation linéaire du tablier | 72 |
| 2.1.1. Déplacement due au retrait..... | 72 |
| 2.1.2. Déplacement due au fluage | 72 |
| 2.1.3. Déplacement due à la variation de température | 72 |
| 2.1.4. Total des variations linéaires..... | 72 |
| 2.2. Vérification des contraintes..... | 73 |
| 2.3. Dimensionnement en plan (a-b) | 73 |
| 2.4. Détermination des dimensions de l'appareil d'appuis | 73 |
| 3. Vérification de l'appareil d'appuis..... | 75 |
| 3.1. La répartition des efforts horizontaux | 75 |
| 3.1.1. Evaluation du point fixe | 75 |
| 3.1.2. Efforts dues aux charges dynamiques | 79 |
| 3.1.3. Variation linéaire du tablier | 80 |
| 3.1.4. Efforts dues aux charges statiques | 80 |
| 4. Vérification des contraintes..... | 82 |
| 4.1. Limitation des contraintes de cisaillement..... | 82 |
| 4.1.1. Sollicitation sous charge verticale..... | 82 |
| 4.1.2. Sollicitation due à un déplacement ou un effort horizontal | 82 |
| 5. Effort due au séisme | 83 |
| 6. Les dés d'appuis | 86 |
| 6.1. Fonctions des dés d'appuis | 86 |
| 6.2. Dimensionnement des dés d'appuis..... | 86 |
| 6.3. Ferrailage des dés d'appuis..... | 86 |
| 7. Les joints de chaussée | 87 |
| 7.1. Définition | 87 |
| 7.2. Les différents types de joints..... | 87 |
| 7.3. Calcul des joints de chaussée | 87 |

Chapitre VI : Etude des piles

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 89 |
| 2. Critère de dimensionnement de la pile | 89 |
| 3. Pré dimensionnement | 89 |
| 4. Détermination des efforts | 90 |
| 4.1. Efforts verticaux..... | 90 |
| 4.2. Efforts horizontaux..... | 90 |
| 4.3. Efforts sollicitant la pile..... | 90 |
| 5. Etude du chevêtre | 91 |
| 5.1. Calcul du ferrailage..... | 92 |
| 6. Etude de la pile..... | 95 |

Table des matières

| | |
|---|-----|
| 6.1. Etude du flambement | 95 |
| 6.2. Ferrailage de la pile..... | 95 |
| 7. Etude et ferrailage de la semelle de liaison | 96 |
| 7.1. Pré dimensionnement | 96 |
| 7.2. Vérification de la stabilité et des contraintes sous semelle | 96 |
| 7.3. Réactions des pieux de la pile | 97 |
| 7.4. Estimation de la charge nominale | 99 |
| 7.5. Ferrailage de la semelle de liaison | 100 |
| 7.6. Ferrailage des pieux de la pile..... | 100 |

Chapitre VII : Etude des culées

| | |
|---|-----|
| 1. Introduction | 101 |
| 2. Choix du type de culée | 101 |
| 3. Implantation des culées | 101 |
| 4. Pré dimensionnement des culées..... | 101 |
| 4.1. Mur de front (M.F)..... | 102 |
| 4.2. Mur garde grève (M.G.G) | 102 |
| 4.3. Dalle de transition (D.T) | 102 |
| 4.4. Mur en retour (M.R)..... | 102 |
| 4.5. Semelle..... | 103 |
| 4.6. Le corbeau..... | 103 |
| 4.7. Le sommier d'appui | 103 |
| 5. Ferrailage du mur garde grève | 104 |
| 5.1. Cas fondamental..... | 104 |
| 5.2. Cas accidentel..... | 105 |
| 5.3. Ferrailage minimum d'après le RPOA | 106 |
| 5.4. Armatures de répartition | 107 |
| 6. La dalle de transition | 107 |
| 6.1. Evaluation des charges..... | 107 |
| 6.2. Ferrailage de la dalle de transition | 107 |
| 7. Etude du corbeau | 109 |
| 7.1. Condition d'une console courte | 109 |
| 7.2. Cisaillement | 109 |
| 7.3. Ferrailage minimum d'après le RPOA | 110 |
| 7.4. Les armatures de répartition..... | 110 |
| 8. Etude du mur en retour..... | 110 |
| 8.1. Dimensionnement | 110 |
| 8.2. Détermination des contraintes..... | 110 |
| 8.2.1. Cas accidentel..... | 110 |
| 8.2.2. Cas fondamental..... | 111 |
| 8.2.3. Détermination du ferrailage | 111 |
| 9. Mur de front | 113 |
| 9.1. Les sollicitations du mur de front | 113 |
| 9.2. Combinaison fondamentale | 113 |

Table des matières

| | |
|---|-----|
| 10. Etude de la semelle de liaison | 115 |
| 10.1. Pré dimensionnement | 115 |
| 10.2. Sollicitations..... | 116 |
| 10.2.1. Efforts horizontaux | 116 |
| 10.2.2. Efforts verticaux | 116 |
| 10.3. Combinaison des charges | 118 |
| 10.4. Vérification de la stabilité et les contraintes sous semelle..... | 119 |
| 10.5. Réactions des pieux de la culée..... | 121 |
| 10.6. Estimation de la charge nominale | 123 |
| 10.7. Ferrailage de la semelle de liaison | 124 |
| 10.8. Ferrailage des pieux de la culée | 124 |
| Conclusion générale | 127 |
| Bibliographie | 128 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1.1. Situation du projet..... | 2 |
| Figure 1.2. Sondage pressiométrique n°2..... | 4 |
| Figure 1.3. Sondage pressiométrique n°4..... | 5 |
| Figure 1.4. Tracé en plan..... | 6 |
| Figure 1.5. Profil en long | 6 |
| Figure 1.6. Profil en travers..... | 7 |
| Figure 1.7. Vérification des fissurations à l'ELU et l'ELS | 10 |
| Figure 1.8. Diagramme contraintes déformations | 11 |
| Figure 2.1. Dimensions de la poutre | 16 |
| Figure 2.2. Coupe longitudinale de la demi-poutre..... | 16 |
| Figure 2.3. Dimensions de la poutre médiane | 17 |
| Figure 2.4. Dimensions de la poutre médiane+ hourdis..... | 18 |
| Figure 2.5. Dimensions de la poutre en travée | 19 |
| Figure 2.6. Dimensions de la poutre+hourdis en travée..... | 20 |
| Figure 2.7. Dimensions de la poutre à l'about | 21 |
| Figure 2.8. Dimensions de la poutre+hourdis à l'about | 22 |
| Figure 2.9. Le système Bc | 25 |
| Figure 2.10. Le système Bt..... | 26 |
| Figure 2.11. Le système Br | 27 |
| Figure 2.12. Surcharge Mc120 | 27 |
| Figure 2.13. Surcharge D280 | 28 |
| Figure 2.14. Modélisation des poutres | 30 |
| Figure 2.15. Modélisation des poutres avec leurs différentes sections | 30 |
| Figure 2.16. Modélisation de la dalle et de l'entretoise | 31 |
| Figure 2.17. Diagramme du moment fléchissant [KN.m] de la poutre de rive..... | 31 |
| Figure 2.18. Diagramme du moment fléchissant [KN.m] de la poutre intermédiaire 1..... | 32 |
| Figure 2.19. Diagramme du moment fléchissant [KN.m] de la poutre intermédiaire 2..... | 32 |
| Figure 2.20. Diagramme du moment de la poutre de rive due à A(L) | 32 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 2.21. Diagramme du moment de la poutre intermédiaire 1 due à A(L)..... | 33 |
| Figure 2.22. Diagramme du moment de la poutre intermédiaire 2 due à A(L)..... | 33 |
| Figure 2.23. Diagramme de l'effort tranchant [KN.m] de la poutre de rive | 36 |
| Figure 2.24. Diagramme de l'effort tranchant [KN.m] de la poutre intermédiaire 1 | 36 |
| Figure 2.25. Diagramme de l'effort tranchant [KN.m] de la poutre intermédiaire 2..... | 36 |
| Figure 3.1. Diagramme de la combinaison quasi-permanente de P1 | 44 |
| Figure 3.2. Diagramme de la combinaison quasi-permanente de P2 | 44 |
| Figure 3.3. Diagramme de la combinaison fréquente de P1 | 45 |
| Figure 3.4. Diagramme de la combinaison fréquente de P2 | 46 |
| Figure 3.5. Diagramme de la combinaison rare de P1 | 47 |
| Figure 3.6. Diagramme de la combinaison rare de P2 | 47 |
| Figure 3.7. Câbles de l'about | 48 |
| Figure 3.8. Tracé des câbles | 50 |
| Figure 3.9. Diagramme des contraintes sous P2 | 58 |
| Figure 3.10. Ferrailage passif de la poutre | 61 |
| Figure 3.11. Détail du ferrailage passif de la poutre | 61 |
| Figure 4.1. Exemple de moment longitudinal maximum..... | 62 |
| Figure 4.2. Ferrailage de la dalle..... | 67 |
| Figure 4.3. Chargement de l'entretoise | 69 |
| Figure 5.1. Appareils d'appuis en élastomère fretté..... | 71 |
| Figure 5.2. Position du joint de chaussée | 75 |
| Figure 5.3. Modélisation de l'appareil d'appui par un ressort | 81 |
| Figure 5.4. Définition géométrique de l'appareil d'appui..... | 81 |
| Figure 5.5. Les dimensions des dés d'appuis | 86 |
| Figure 5.6. Joint de la chaussée..... | 87 |
| Figure 6.1. Plan coffrage pour les piles types | 89 |
| Figure 6.2. Modélisation du chevet..... | 92 |

Liste des figures

| | |
|--|-----|
| Figure 6.3. Dessin de la coupe de la semelle..... | 96 |
| Figure 7.1. Pré dimensionnement du corbeau | 103 |
| Figure 7.2. Dessin de la culée 1 | 104 |
| Figure 7.3. Sollicitations du mur garde grève | 104 |
| Figure 7.4. Dimensions du mur en retour..... | 110 |
| Figure 7.5. Modélisation du mur en retour..... | 112 |
| Figure 7.6. Pré dimensionnement de la semelle de liaison | 115 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1.1. Ponts à plusieurs travées..... | 7 |
| Tableau 2.1. Calcul des données géométriques de la poutre médiane | 17 |
| Tableau 2.2. Caractéristiques géométriques de la poutre médiane | 18 |
| Tableau 2.3. Caractéristiques géométriques de la poutre médiane+hourdis | 19 |
| Tableau 2.4. Calcul des données géométriques de la poutre en travée | 19 |
| Tableau 2.5. Caractéristiques géométriques de la poutre en travée | 20 |
| Tableau 2.6. Caractéristiques géométriques de la poutre+hourdis en travée | 20 |
| Tableau 2.7. Calcul des données géométriques de la poutre à l'about..... | 21 |
| Tableau 2.8. Caractéristiques géométriques de la poutre à l'about..... | 21 |
| Tableau 2.9. Caractéristiques géométriques de la poutre+hourdis à l'about | 22 |
| Tableau 2.10. Charges permanentes..... | 23 |
| Tableau 2.11. Classe de pont..... | 24 |
| Tableau 2.12. Les valeurs du coefficient a_1 | 24 |
| Tableau 2.13. Les valeurs de V_0 | 24 |
| Tableau 2.14. Les valeurs du coefficient b_c | 25 |
| Tableau 2.15. Les valeurs de b_t | 26 |
| Tableau 2.16. Tableau récapitulatif des moments fléchissant..... | 34 |
| Tableau 2.17. Coefficients des combinaisons d'actions | 34 |
| Tableau 2.18. Tableau récapitulatif des moments à l'ELU | 35 |
| Tableau 2.19. Tableau récapitulatif des moments à l'ELS..... | 35 |
| Tableau 2.20. Tableau récapitulatif des efforts tranchants..... | 37 |
| Tableau 2.21. Tableau récapitulatif des efforts à l'ELU | 37 |
| Tableau 2.22. Tableau récapitulatif des efforts à l'ELS..... | 38 |
| Tableau 3.1. Récapitulatif des résultats de précontrainte | 42 |
| Tableau 3.2. Combinaison quasi-permanente de P1 | 43 |
| Tableau 3.3. Combinaison quasi-permanente de P2 | 44 |
| Tableau 3.4. Combinaison fréquente de P1..... | 45 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 3.5. Combinaison fréquente de P2..... | 46 |
| Tableau 3.6. Combinaison rare de P1..... | 46 |
| Tableau 3.7. Combinaison rare de P2..... | 47 |
| Tableau 3.8. Tableau récapitulatif du tracé des câbles..... | 49 |
| Tableau 3.9. Les valeurs des pertes par frottements à $x=0,50L$ | 51 |
| Tableau 3.10. Les valeurs des pertes par frottements à $x=0,25L$ | 51 |
| Tableau 3.11. Les valeurs de « d »..... | 51 |
| Tableau 3.12. Les pertes par recule d'ancrage..... | 52 |
| Tableau 3.13. Les pertes par raccourcissement instantané pour l'about..... | 52 |
| Tableau 3.14. Les pertes par raccourcissement instantané pour l'extrados..... | 53 |
| Tableau 3.15. Les pertes instantanées totales des câbles de l'about..... | 53 |
| Tableau 3.16. Les pertes instantanées totales des câbles de l'extrados..... | 53 |
| Tableau 3.17. Les pertes dues au retrait du béton..... | 54 |
| Tableau 3.18. Les pertes dues au fluage du béton..... | 54 |
| Tableau 3.19. Les pertes dues à la relaxation des aciers pour les câbles de l'about..... | 55 |
| Tableau 3.20. Les pertes dues à la relaxation des aciers pour les câbles de l'extrados..... | 55 |
| Tableau 3.21. Les pertes de tensions différées totales des câbles de l'about..... | 55 |
| Tableau 3.22. Les pertes de tensions différées totales des câbles de l'extrados..... | 56 |
| Tableau 3.23. Pourcentage réel des pertes..... | 56 |
| Tableau 3.24. Caractéristiques géométriques de la poutre à la mise en tension..... | 56 |
| Tableau 3.25. Détermination des contraintes à la mise en tension..... | 57 |
| Tableau 3.26. Caractéristiques géométriques de la poutre en service..... | 57 |
| Tableau 3.27. Détermination des contraintes en service..... | 57 |
| Tableau 4.1. Moments fléchissant à l'ELU..... | 63 |
| Tableau 4.2. Moments fléchissant à l'ELS..... | 63 |
| Tableau 4.3. Efforts tranchants à l'ELU et l'ELS..... | 64 |
| Tableau 4.4. Ferrailage de l'hourdis en travée à l'ELU..... | 65 |
| Tableau 4.5. Ferrailage de l'hourdis en appui à l'ELS..... | 65 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 4.6. Ferrailage de l'hourdis en travée à l'ELU | 66 |
| Tableau 4.7. Ferrailage de l'hourdis en appui à l'ELS | 66 |
| Tableau 4.8. Moments fléchissant de l'entretoise à l'ELU et l'ELS..... | 69 |
| Tableau 4.9. Ferrailage de l'entretoise à l'ELU | 69 |
| Tableau 4.10. Ferrailage de l'entretoise à l'ELS..... | 69 |
| Tableau 5.1. Déplacement et rigidité de l'appareil d'appui et des appuis..... | 78 |
| Tableau 5.2. Centre élastique | 79 |
| Tableau 5.3. Répartition de l'effort de freinage de Bc sur piles et culées..... | 79 |
| Tableau 5.4. Répartition de l'effort variation linéaire..... | 80 |
| Tableau 5.5. Les raideurs des appareils d'appuis | 81 |
| Tableau 5.6. Classification du pont | 83 |
| Tableau 5.7. Valeurs de T1,T2 et S pour la composante horizontale..... | 84 |
| Tableau 5.8. Valeurs de T1,T2 et S pour la composante verticale..... | 85 |
| Tableau 5.9. Répartition des efforts sismiques | 85 |
| Tableau 6.1. Récapitulatif des hauteurs des futs et piles..... | 89 |
| Tableau 6.2. Efforts sollicitant la pile à l'ELU | 90 |
| Tableau 6.3. Efforts sollicitant la pile à l'ELS | 91 |
| Tableau 6.4. Efforts sollicitant la pile à la combinaison accidentelle | 91 |
| Tableau 6.5. Moments et efforts tranchants du chevêtre..... | 92 |
| Tableau 6.6. Efforts sollicitant sous semelle à l'ELU | 96 |
| Tableau 6.7. Efforts sollicitant sous semelle à l'ELS | 97 |
| Tableau 6.8. Efforts sollicitant sous semelle à la combinaison accidentelle..... | 97 |
| Tableau 6.9. Réactions des pieux sous les différentes combinaisons | 100 |
| Tableau 7.1. La position des culées..... | 101 |
| Tableau 7.2. Sollicitations dans le mur garde grève..... | 105 |
| Tableau 7.3. Calcul de la poussée dynamique des terres | 111 |
| Tableau 7.4. Les contraintes sur le mur en retour | 111 |
| Tableau 7.5. Moments et efforts tranchants à l'ELU et l'ELS..... | 112 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 7.6. Récapitulatif des moments à l'ELU | 113 |
| Tableau 7.7. Récapitulatif des moments à l'ELS | 114 |
| Tableau 7.8. Poids propre de la culée..... | 116 |
| Tableau 7.9. Sous charge permanente | 118 |
| Tableau 7.10. Récapitulatif des sollicitations à l'ELU..... | 119 |
| Tableau 7.11. Récapitulatif des sollicitations à l'ELS | 120 |
| Tableau 7.12. Récapitulatif des sollicitations à la combinaison accidentelle | 121 |
| Tableau 7.13. Réactions des pieux sous les différentes combinaisons | 124 |
| Tableau 7.14. Sollicitations au niveau de la semelle..... | 125 |

Introduction générale

Le pont est un ouvrage qui permet de franchir un obstacle naturel ou une voie de circulation terrestre, fluviale ou maritime. On distingue plusieurs types de ponts tel que : le pont route qui permet la circulation des véhicules, le viaduc qui permet le franchissement à grande hauteur d'une brèche, l'aqueduc, les passerelles et aussi les ponts ferroviaires.

Dans le cadre du développement des réseaux routiers la direction des travaux publics de la wilaya de NÂAMA propose un aménagement de la route Chemin Wilaya 03 qui traverse OUED ESSAM sur plus de 200m ; pour cela la réalisation d'un pont a été proposé; la nécessité d'un tel ouvrage est justifiée en remplacement d'un tronçon jusqu'ici submersible.

Il faut disposer de toutes les données nécessaires à l'étude telle que :

- Les données naturelles : qui concernent le sol, les rivières à franchir, leurs hydrologies ainsi que l'ensemble des éléments de son environnement.
- Les données fonctionnelles de l'ouvrage : qui sont fixées par le maître de l'ouvrage, c'est un ensemble de caractéristiques permettant au pont d'assurer sa fonction d'ouvrage de franchissement.

Le souci principal de l'ingénieur est comment concevoir un pont, en visant l'optimisation entre plusieurs paramètres déterminants (la faisabilité, l'économie, la sécurité des usagers, l'esthétique de l'ouvrage et les délais de réalisation).

1. INTRODUCTION

Un pont est une construction qui permet de franchir une dépression ou un obstacle (cours d'eau, voie de communication, vallée, ravin...) en passant par-dessus cette séparation. Le franchissement supporte le passage d'hommes et de véhicules dans le cas d'un pont routier ou d'eau dans le cas d'un aqueduc.

2. PRESENTATION GENERAL DU PROJET

2.1. Présentation de l'ouvrage

L'ouvrage en question est un pont situé au niveau du CW03, plus exactement entre les points kilométriques 0+507,26 et 0 +708,66 ; reliant ainsi la route nationale n°6 et le village d'AMAR. Ce pont a été conçu pour franchir l'obstacle qu'est **OUED ESSAM** dans la Wilaya de NÂAMA.

Sa longueur totale est de **200,4m** ; tandis que sa largeur est de **10,00m** ; l'ouvrage est droit. Le tablier est constitué de **06** poutres de section en forme de T avec âme variable en béton précontraint. Ces poutres transmettent les efforts aux appuis à travers des appareils d'appui en néoprène fretté. En ce qui concerne l'infrastructure, on prévoit des piles à section pleine, ainsi que des culées sur des fondations profondes. La dalle de transition a une longueur de 5m.

Le pont est constitué de **six** travées indépendantes de **33,40m**.

Ce pont repose sur **deux** culées et **cinq** piles en béton armé, qui eux même reposent sur des semelles de liaisons fixées sur pieux forés en béton armé.

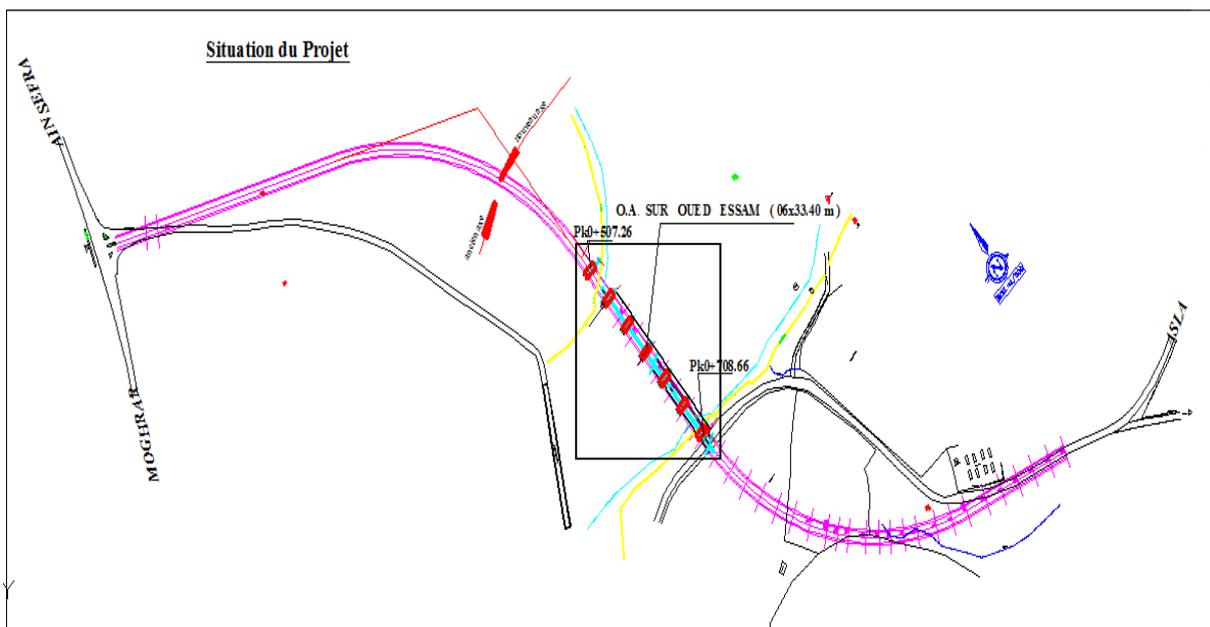


Figure 1.1. situation du projet

2.2. Les Données Géotechniques

2.2.1. Généralités

Les travaux de sondage ont été effectués sous chaque appui.

2.2.2. Contexte géologique

- **Topographie**

La zone d'implantation du pont est caractérisée par un relief accidentée, dont la plus haute côte est de 334,893m, alors que la plus basse est de 306,207 m.

- **Hydrologie**

L'ouvrage est conçu pour franchir un oued, Le lit de cet oued est assez plat mais particulièrement irrégulier. Des deux côtés de l'oued, on trouve de vastes terrains labourés en sol argileux meuble avec un peu de caillou.

La zone à franchir a un bassin versant d'environ 77,52 km² selon l'ANRH. Il est prévu un débit maximum de 190,38m³/s et une vitesse d'écoulement de 2,18m/s. Le niveau de l'oued en période de crue attendu est de 310 m.

- **Lithologie**

La couche d'assise de la zone d'implantation du pont est une structure simple, la partie supérieure est constituée d'un sol argileux, la partie inférieure d'une marne intensément altérée.

- **Structure des différentes coupes lithologiques**

D'après les résultats des essais préssiométriques on a constaté les couches suivantes :

Présentation du projet

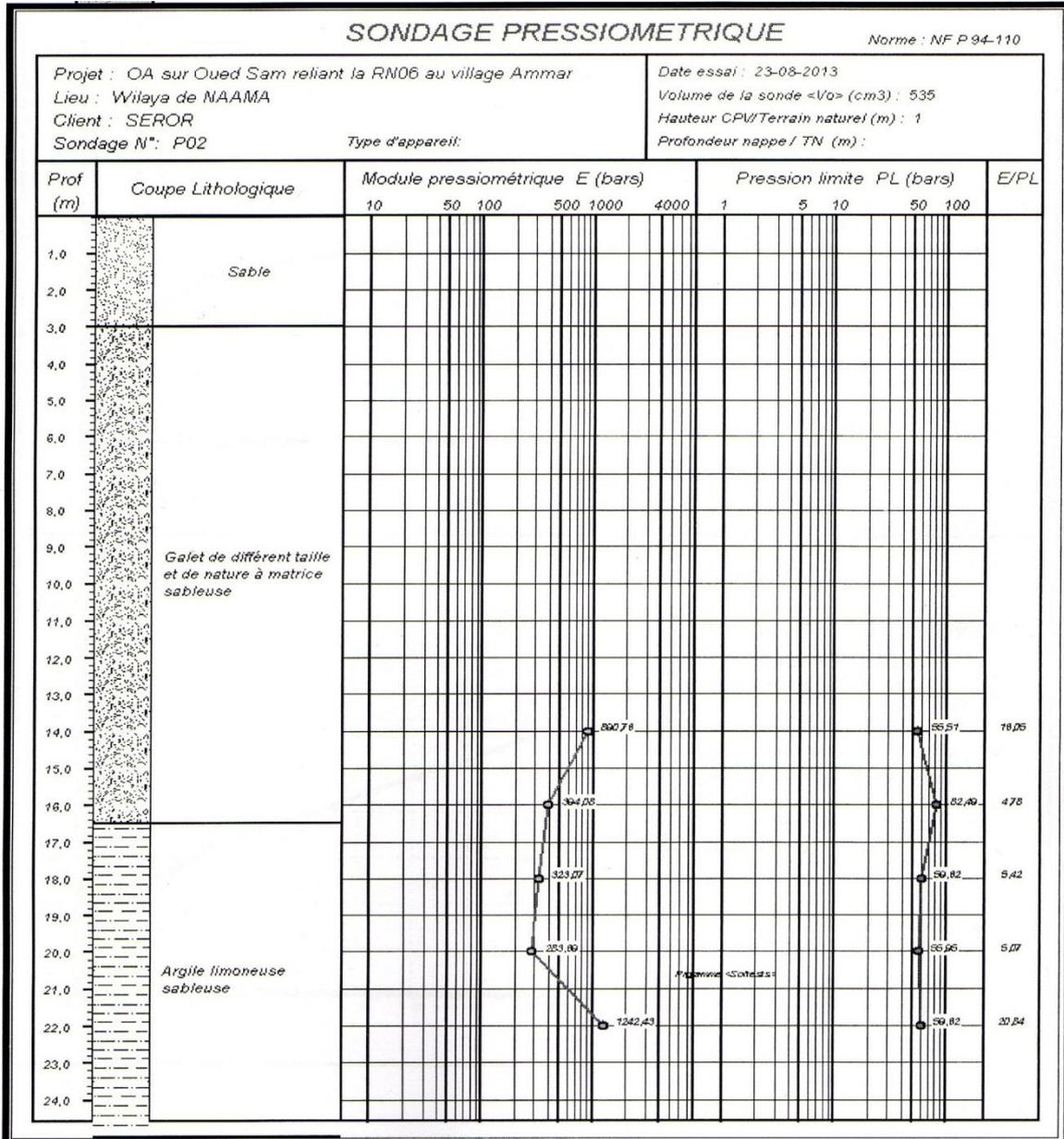


Figure 1.2. Sondage pressiométrique n°2

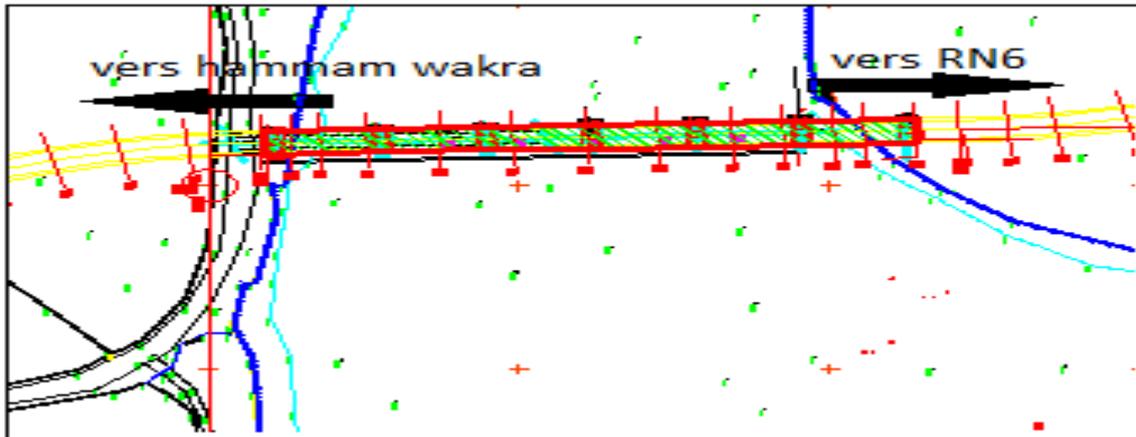


Figure 1.4. Tracé en plan

2.3.2. Profil en long

Le profil en long est la ligne située sur l'axe de l'ouvrage, définissant en élévation du tracé en plan. Il doit être défini en tenant compte de nombreux paramètres liés aux contraintes naturelles.

Le tracé de la voie routière présente une pente de **0,35%** ; le pont franchit un oued non navigable, son gabarit n'est pas conditionné par les contraintes fonctionnelles mais par des contraintes naturelles.

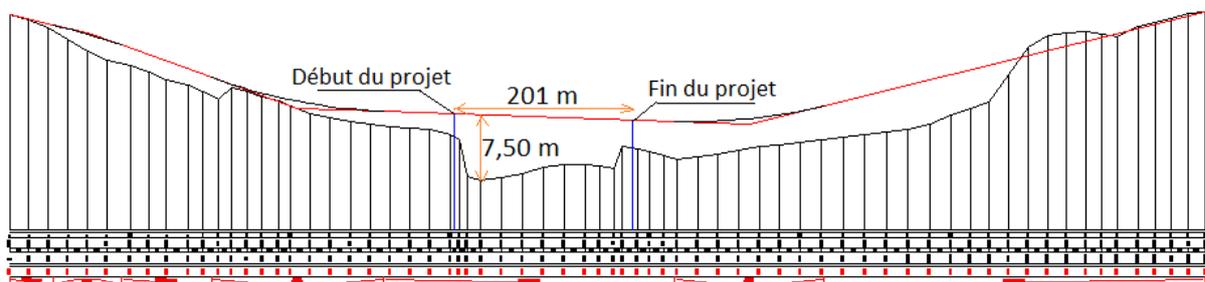


Figure 1.5. Profil en long

2.3.3. Profil en travers

Le profil en travers est l'ensemble des éléments définissant la géométrie et l'équipement de la voie dans le sens transversal.

- La largeur totale de l'ouvrage : 10 m
- Largeur roulable : $L_r = 7,50$ m.
- Nombre de voies de circulations : $N = 2$ voies.
- La pente : 2,5 % en toit.
- Largeur de trottoir : $L = 1,25$ m.

Présentation du projet

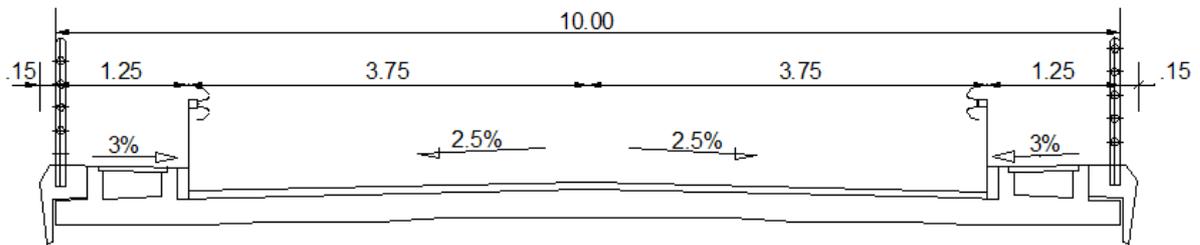


Figure 1.6. Profil en travers

2.4. Choix de l'ouvrage :

La portée principale de l'ouvrage est l'aspect essentiel pour le choix de ce dernier avec quelques aspects architecturaux, économiques et durables, ces aspects sont :

- Rapport des dimensions : tous les éléments du pont sont dimensionnés avec les normes prescrites dans les différents règlements tel que le B.A.E.L, B.P.E.L, R.P.O.A.
- La durée de la réalisation.
- Intégration de la structure dans son environnement : puisque nous sommes loin de l'agglomération nous allons essayer de prendre un ouvrage simple et économique.
- La capacité technique et économique des bureaux d'étude et des entreprises.

Le tableau ci-dessous présente les types des ponts en fonction de notre portée :

| La portée (m) | < 20m | Entre 20 et 50m | Entre 50 et 300m | > 300m |
|-------------------------|---|---|--|--|
| Les solutions probables | Pont dalle en béton armé ou en béton précontraint | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Pont dalle à encorbellement ✓ Pont mixte a poutres métalliques ✓ Pont a poutres en béton précontraint | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Pont en béton précontraint Construit encorbellement ✓ Pont a poutre continue en acier ✓ Pont a hauban | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Pont suspendu ✓ Pont a hauban |

Tableau 1.1. Ponts à plusieurs travées(1)

Etant donné le nombre de travées de notre ouvrage, ainsi que la portée de chacune de ses travées (33,40 m) ; on se trouve dans la case pont à plusieurs travées avec des portées allant entre 20 et 50 m.

Dans cette catégorie nous avons choisi le pont à poutre en béton précontraint.

- Pont a poutre en béton précontraint

Les avantages :

- La possibilité d'assembler des éléments préfabriqués sans échafaudage.
- La possibilité de franchir plusieurs portées.
- La réduction du nombre d'appuis.

Les inconvénients :

- Le poids de la structure qui devient très important.
- Les déformations des poutres à cause des différentes sollicitations.
- La difficulté de réalisation.

3. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Le choix des matériaux de construction conditionne en grande partie la conception du pont.

On donne ici les caractéristiques du béton, des aciers actifs et passifs de construction en relation directe avec notre calcul.

3.1. béton

Le béton contient le ciment, sable, le gravier, l'eau et éventuellement les adjuvants (SIKA) il est le matériau le plus utilisé dans le domaine de bâtiment et travaux publics.

La qualité du béton dépend de la qualité de ces constituants, des techniques de fabrication et de mise en œuvre.

Le béton est défini par la valeur de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours qui est notée f_{c28} .

Le béton est dosé à 400 kg/m^3 de ciment CPA 325, avec un contrôle strict.

Densité : La masse volumique du béton armé : $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$.

3.1.1. Résistance caractéristique à la compression

Selon les règles de BAEL et BPEL, pour un béton âgé de j jours, on a :

$$f_{cj} = \begin{cases} 35 \text{ MPA} & \text{si } j \geq 28 \text{ jours.} \\ 20 \text{ MPA} & \end{cases}$$

$$f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83xj} \times f_{c28} \quad \text{si } j < 28 \text{ jours.}$$

Avec : $f_{c28} = 20 \text{ Mpa}$ pour le béton de propreté.

$f_{c28} = 35 \text{ Mpa}$ pour le béton du tablier ; élévation des piles ; les culées et fondations.

3.1.2. Résistance caractéristique à la traction

La résistance à la traction est liée à la résistance à la compression :

$$f_{tj} = 0,6+0,06 \times f_{cj} \quad \text{Selon les règles du BAEL et BPEL}$$

3.1.3. Contrainte admissible

On fixe la valeur de contrainte qui ne peut être dépassée en aucun point de l'ouvrage, cette contrainte est appelée contrainte admissible.

- **Contrainte admissible pour l'ELU**

Selon les règles du BAEL et BPEL

$$f_{bu} = \frac{0,85 f_{cj}}{\theta \times \gamma_b}$$

Avec :

$\theta=1$ lorsque la durée probable d'application de la combinaison d'action considérée est supérieure à 24h.

$\theta=0,9$ lorsque cette durée est comprise entre 1h et 24h.

$\theta=0,85$ lorsqu'elle est inférieure à 1h.

$$\gamma_b = \begin{cases} 1,5 & \text{en situations durables.} \\ 1,15 & \text{en situations accidentelles.} \end{cases}$$

- **Contrainte admissible de service (ELS)**

La contrainte à l'état limite de service est donnée par :

$$\sigma = \begin{cases} 0,5 \times f_{c28} & \text{en service.} \\ 0,6 \times f_{c28} & \text{en construction.} \end{cases}$$

3.1.4. Coefficient de poisson

Le coefficient de poisson ν représente la variation relative de dimension transversale d'une Pièce soumise à une variation relative de dimension longitudinale.

Selon les règles du BAEL et BPEL on prend :

$\nu = 0,2$ pour un béton non fissuré

$\nu = 0$ pour un béton fissuré

3.1.5. Déformation longitudinale du béton

On considère un module de déformation longitudinal pour le béton E défini par les règles B.P.E.L comme suit :

- Module de déformation instantanée (courte durée <24 heures) :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}} \text{ MPA.}$$

- Module de déformation différée (longue durée) :

$$E_{ij} = 3700 \sqrt[3]{f_{cj}} \text{ MPA.}$$

3.1.6. Module de déformation transversale du béton

Le module de déformation transversale du béton est donné par la formule suivante :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

ν : Coefficient de poisson.

3.2. L'acier

Les aciers utilisés dans les ouvrages en béton précontraint sont de deux natures différentes :

- Les aciers actifs, qui créent, et maintiennent la précontrainte sur le béton.
- Les aciers passifs nécessaires pour reprendre les efforts tranchants pour limiter la fissuration.

3.2.1. L'acier passif

Les valeurs de la limite élastique sont les mêmes en traction et en compression.

Les aciers utilisés pour le béton sont des armatures courantes à haute adhérence de classe FeE400, avec une limite d'élasticité de **400Mpa**.

$$\begin{aligned} \text{Pour } \Phi \leq 20\text{mm} : & \left\{ \begin{array}{l} \sigma_e = 4200 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_a = 2800 \text{ kg/cm}^2 \end{array} \right. \\ \text{Pour } \Phi \geq 20\text{mm} : & \left\{ \begin{array}{l} \sigma_e = 4000 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_a = 2670 \text{ kg/cm}^2 \end{array} \right. \end{aligned}$$

Le module d'élasticité de l'acier est de : $E_s = 195000 \text{ MPa}$.

| ETAT CONSIDERE | ELS | ELU |
|--------------------------------|---|---|
| Fissuration peu nuisible | rien à vérifier | |
| Fissuration préjudiciable | $\bar{\sigma}_{st} \leq \text{Inf} \left[\frac{2}{3} f_e ; 110 \sqrt{\eta \cdot f_{ty}} \right]$ où $\eta = 1$ pour RL et $\eta = 1.6$ pour HA | $f_{su} = \frac{f_e}{\gamma_s}$ où $\gamma_s = 1.15$ |
| Fissuration très préjudiciable | $\bar{\sigma}_{st} \leq \text{Inf} \left[\frac{f_e}{2} ; 90 \sqrt{\eta \cdot f_{ty}} \right]$ | |

Figure 1.7. Vérification des fissurations à l'ELU et l'ELS

- **Diagramme contrainte déformation**

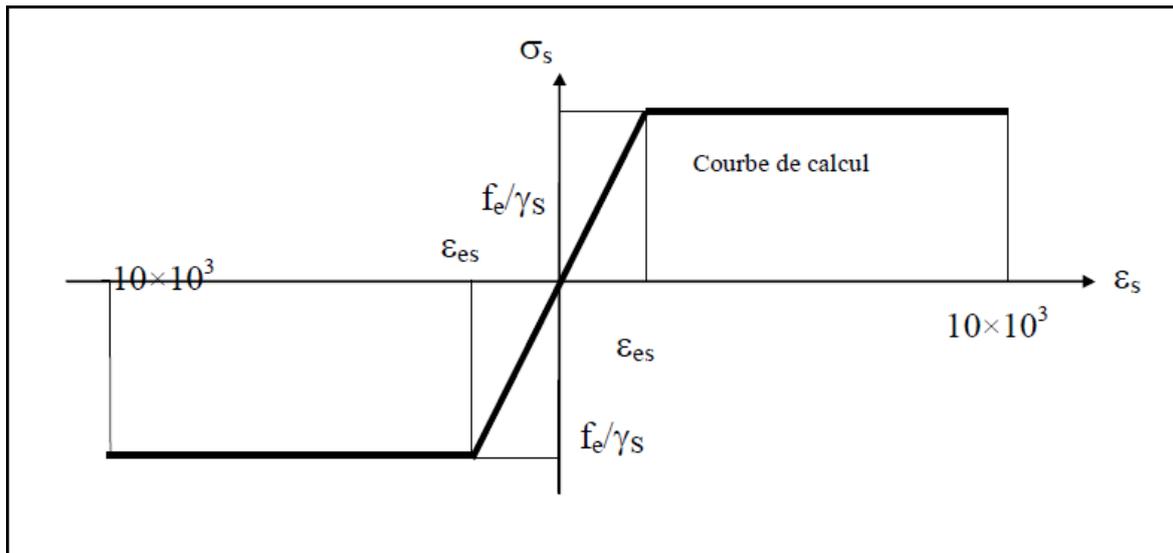


Figure 1.8. Diagramme contraintes déformations(2)

3.2.2. L'acier actif

Les armatures actives sont des armatures en acier à haute résistance qu'on utilise pour les constructions en béton précontraint par pré tension, ou post tension.

- Les armatures actives de précontrainte sont sous tension même sans aucune sollicitation extérieure.
- Les aciers de précontraints ont été classé par catégories : fils, barres, torons.

La précontrainte initiale à prendre en compte dans les calculs est donnée par la formule suivante :

$$P_0 = (0,8 f_{prg} ; 0,9 f_{peg}).$$

Avec :

f_{prg} : la limite de rupture garantie de l'acier de précontrainte.

f_{peg} : la limite d'élasticité de l'acier de précontrainte.

On utilise des câbles **T15** car ce type de câble est réservé aux ouvrages de très grandes portées 130 à 150 m.

• La limite élastique

Comme ces aciers n'ont pas de palier de plasticité, on définira la limite élastique comme étant un allongement résiduel de 0,1%. La limite élastique conventionnelle des aciers représente 89% de la résistance garantie à la rupture.

Dans les calculs relatifs à l'E.L.U on introduit un coefficient ; tel que :

$\gamma_s = 1$ situation accidentelle

$\gamma_s = 1,15$ situation durable ou transitoire.

- **Contrainte limite de traction**

- En fissuration peu nuisible $\sigma_s \leq f_e / \gamma_s$;
- En fissuration préjudiciable $\sigma_s = \min \left(\frac{2}{3} f_e ; 110 \sqrt{\eta f_t j} \right)$;
- En fissuration très préjudiciable $\sigma_s = \min \left(\frac{1}{2} f_e ; 90 \sqrt{\eta f_t j} \right)$;

Avec :

$\eta = 1$ → Treillis soudés et ronds lisses.

$\eta = 1,6$ → Aciers à haute adhérence.

- **Module de Young**

Le module d'élasticité longitudinal " E_p " des aciers de précontrainte est pris égale à :

$E_p = 200\,000 \text{ MPa}$ pour les barres.

$E_p = 190\,000 \text{ MPa}$ pour les torons.

1. INTRODUCTION

Cette étude consiste à déterminer d'un point de vue esthétique et technique le type d'ouvrage qui répond aux exigences imposées.

Pour ce faire, il faut disposer de certains éléments essentiels :

- Les données fonctionnelles.
- Les données naturelles.
- Le profil en long.
- Le gabarit à respecter.
- Portée de l'ouvrage.
- Délais de réalisation.
- Durée de l'utilisation.

2. PRE DIMENSIONNEMENT

L'ouvrage est un pont à poutre, son dimensionnement se fait selon les recommandations du guide S.E.T.R.A des ponts routiers à poutres.

2.1. Longueur des travées

Le pont comporte 06 travées de 33,40m, la longueur total sera de 200,4m (voir plans).

2.2. Largeur des voies

La largeur d'une voie est de 3,75m ; la largeur roulable étant 2x3,75m avec deux trottoirs de 1,25m chacun. Donc la largeur totale de l'ouvrage est de 10 m (voir plans).

2.3. Hauteur des poutres

D'après le guide S.E.T.R.A la hauteur des poutres est donnée dans l'intervalle:

$$\frac{l}{22} \text{ et } \frac{l}{15}$$

Avec : l : la portée réel de la poutre.

$$l = 33,4\text{m}$$

$$1,51\text{m} \leq ht \leq 2,22\text{m}$$

$$ht = 1,75\text{m}$$

$$h_p = ht - h_h = 1,75\text{m} - 0,25\text{m} = 1,5\text{m}$$

Avec :

h_p : hauteur de la poutre

h_h : hauteur de l'hourdis

2.4. Largeur de la table de compression

D'après le guide S.E.T.R.A la largeur de la table de compression est voisine de 60% de la hauteur de la poutre.

$$0,6h_p < b \leq 0,7h_p \longrightarrow 0,9m < b \leq 1,05m$$

Avec :

b : largeur de la table de compression

On prend : $b = 1,03m$

2.5. Espacement des poutres

Comme nous avons envisagé l'emploi de poutres en section I la largeur de la table de compression est légèrement inférieure à celle du talon, l'espacement doit respecter la loi suivante : $1,5 \leq E \leq 2,5$

On prend : $E=1,65m$

2.6. Nombre de poutres

Le nombre de poutre est déterminé par l'équation suivante :

$$N = \left(\frac{La}{E} \right) + 1$$

Avec :

La: est la distance entre appuis de rive $La = 8,25m$

$$N = 8,25/1,65 + 1 = 6 \text{ poutres}$$

$N = 6$ poutres

2.7. Epaisseur de l'âme

D'après le guide S.E.T.R.A, on a deux situations :

- Médiante : $0,16m \leq b_0 \leq 0,22m \Leftrightarrow b_0 = 0,21 \text{ m}$
- Sur appuis : L'épaisseur de l'âme à l'about de la poutre doit être grande à cause de l'augmentation des efforts tranchants.

$$b_0 = bt \Leftrightarrow b_0 = 0,47m$$

- A l'intermédiaire : $0,25m \leq b_0 \leq 0,35m \Leftrightarrow b_0 = 0,35m$

2.8. Epaisseur de la table de compression

D'après le guide S.E.T.R.A, l'épaisseur h_c de la table de compression pourra être donnée d'environ 10 cm.

Dans notre cas, on prend $h_c=11cm$.

2.9. Largeur du talon

D'après le guide S.E.T.R.A la largeur du talon est donnée par la formule suivante :

$$b_t \geq \frac{l \times L^2}{K_t \times h_t^2}$$

Avec :

L : largeur du tablier

L : portée de la travée

h_t : hauteur total du tablier

K : coefficient sans dimension $1100 \leq K \leq 1300$ on prend : $K=1250$

$$b_{tT} = \frac{10,00 \times 32,40^2}{1250 \times 1,75^2}$$

$$b_{tT} = 2,74 \text{ m}$$

$$\text{Largeur d'un talon : } b_t \geq \frac{2,74}{6} \rightarrow b_t = 0,47 \text{ m}$$

2.10. Epaisseur du talon

D'après le guide **S.E.T.R.A.**, l'épaisseur du talon est tirée l'inégalité suivante: $10\text{cm} \leq e_t \leq 20\text{cm}$

On prend : $e_t = 15\text{cm}$

2.11. Gousset

C'est l'angle reliant la table de compression et le talon avec l'âme pour permettre d'améliorer la section de la poutre et de loger les armatures d'acier et les câbles précontraint.

Cet angle est fixé entre : $45^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$.

2.11.1. Largeur du gousset de la table de compression

Médiane : $\alpha_1 = 45^\circ$ $e_1 = 10 \text{ cm}$

$\alpha_2 = 79,05^\circ$ $e_2 = 31 \text{ cm}$

A l'intermédiaire : $\alpha_1 = 45^\circ$ $e_1 = 3 \text{ cm}$

$\alpha_2 = 79,05^\circ$ $e_2 = 31 \text{ cm}$

A l'appui : $\alpha_0 = 79,05^\circ$ $e_1 = 28 \text{ cm}$

2.11.2. Largeur du gousset du talon

Médiane : $\alpha = 56,98^\circ$ $e_0 = 13 \text{ cm}$

A l'intermédiaire : $\alpha = 56,98^\circ$ $e_0 = 6 \text{ cm}$

2.12. Entretoise

Les entretoises faisant fonction de poutraison transversale assurent la répartition des charges entre les poutres et permettent de bloquer les poutres à la torsion sur appuis.

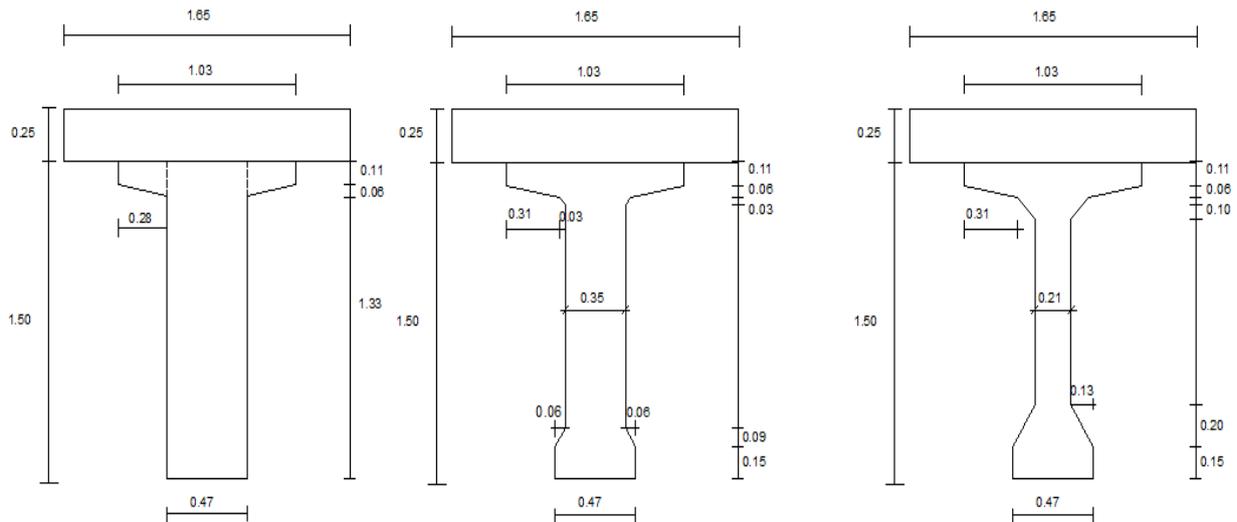
$$h_{\text{entretoise}} = h_p - 0,6 = 0,9 \text{ m}$$

2.13. Épaisseur de la dalle

En général L'épaisseur de la dalle varie selon l'espacement entre axes des poutres, plus L'entraxe est grand plus l'épaisseur de la dalle est grande pour répondre mieux aux efforts de Flexions transversale, l'épaisseur de la dalle est comprise entre 0,20 et 0,30m :

$$0,20 \leq e_d \leq 0,30m$$

On prend : **ed = 0,25m.**



Coupe 1-section d'about

coupe 2-section intermédiaire

coupe 3-section médiane

Figure 2.1. Dimensions de la poutre

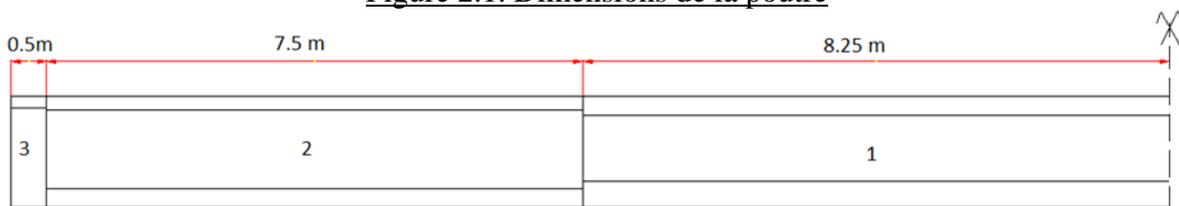


Figure 2.2. Coupe longitudinale de la demi-poutre

2.14. Caractéristiques géométriques de la poutre

La section de la poutre est :

- En « T » aux abouts, pour reprendre l'effort tranchant qui s'y développe.
- En « I » au milieu, pour alléger le poids de la poutre.

On décompose la poutre en éléments simples(4).

- Bi : section brute.
- Zi : distance du centre de gravité de la section (i) à la base de la poutre.
- Ii: moment d'inertie de la section i par rapport à la base de la poutre.
- Si : moment statique de la section Si = BixZi

Etude du tablier

- V' : distance du C.D.G de la section totale à la fibre inférieure.
- V : distance du C.D.G de la section totale à la fibre supérieure.
- I_0 : Moment d'inertie propre de la section considérée.
 - Pour une section triangulaire $\Rightarrow I_0 = bh^3/36$
 - Pour une section rectangulaire $\Rightarrow I_0 = bh^3/12$
- I_G : moment d'inertie par rapport au C.D.G de la section totale $I_G = I - B \times V^2$
- W_i : module d'inertie de la section par rapport à la fibre supérieure.
- W_s : module d'inertie de la section par rapport à la fibre inférieure.
- i : rayon de giration de la section. $i^2 = \frac{I_G}{B}$
- ρ : coefficient de rendement de la section. $\rho = \frac{I_G}{B \times V \times V'}$

2.14.1. Caractéristiques géométriques de la section médiane

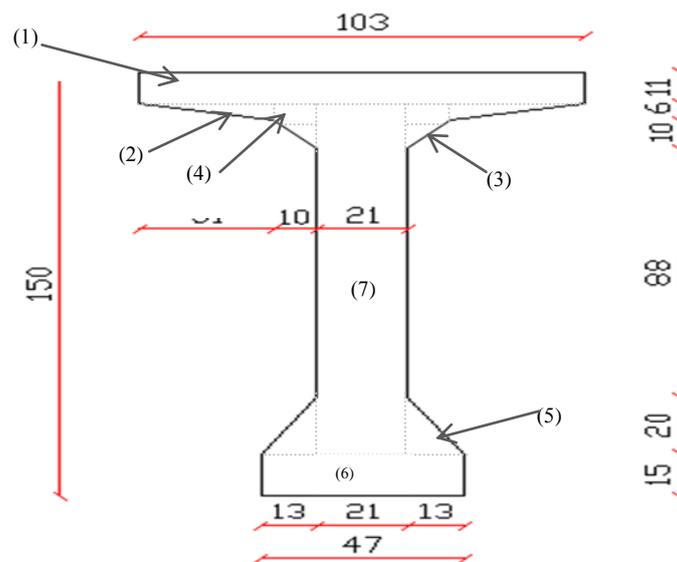


Figure 2.3. Dimensions de la poutre médiane

| Section | Dimension (cm) | B (cm ²) | Z (cm) | I ₀ (cm ⁴) | I (cm ⁴) |
|---------|-----------------|----------------------|--------|-----------------------------------|------------------------|
| (1) | 103×11 | 1133 | 144,5 | 11424,416 | 2,3668×10 ⁷ |
| (2) | ((31×6)/2) × 2 | 186 | 137 | 372 | 3491406 |
| (3) | ((10×10)/2) × 2 | 100 | 129,66 | 555,55 | 1681727,11 |
| (4) | (10×6) × 2 | 120 | 136 | 360 | 2219880 |
| (5) | ((13×20)/2) × 2 | 260 | 21,66 | 5777,77 | 127758,22 |
| (6) | 47×15 | 705 | 7,5 | 13218,75 | 52875 |
| (7) | 21×124 | 2604 | 77 | 3336592 | 18775708 |

Tableau 2.1. Calcul des données géométriques de la poutre médiane

Etude du tablier

On a: $I = I_0 + Z^2 \times B$ (section)

$$\text{Et : } V' = \frac{\sum S/axe}{\sum B} = \frac{429913,6}{5108} = 84,2 \text{ cm}$$

Avec: $S = B \times Z$

$$V = h - V' = 150 - 84,2 = 65,8 \text{ cm}$$

$$I_G = I - B \times V'^2 = 50017354,33 - 5108 \times 84,2^2 = 13803473,21 \text{ cm}^4$$

$$\rho = I_G / (B \times V \times V') = 0,488 = 48,8\%$$

| | |
|---------------------------------------|-------------|
| B (cm²) | 5108 |
| V' (cm) | 84,2 |
| V (cm) | 65,8 |
| I_G (cm⁴) | 13803473,21 |
| ρ (%) | 48,8 |

Tableau 2.2. Caractéristiques géométriques de la poutre médiane

2.14.2. Caractéristiques géométriques de la section médiane+hourdis

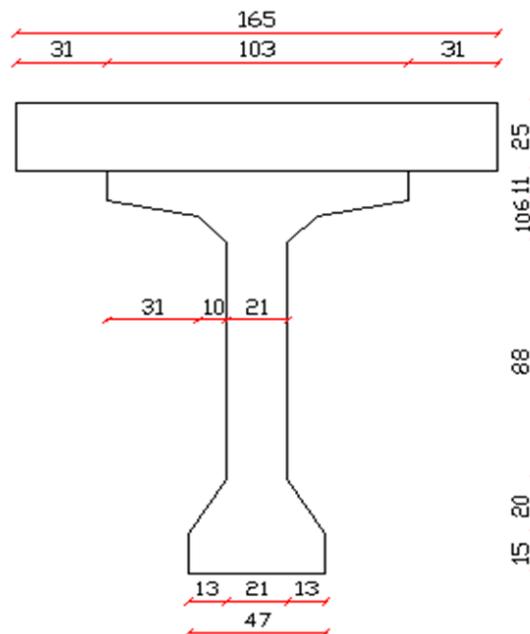


Figure 2.4. Dimensions de la poutre médiane+hourdis

$$V' = \frac{\sum S/axe}{\sum B} = \frac{1100226,1}{9233} = 119,16 \text{ cm}$$

$$V = h - V' = 175 - 119,16 = 55,84 \text{ cm}$$

$$I_G = I - B \times V'^2 = 159157979,3 - 9233 \times 119,16^2 = 28057637,33 \text{ cm}^4$$

$$\rho = I_G / (B \times V \times V') = 0,4567 = 45,67\%$$

Etude du tablier

| | |
|---------------------------------------|-------------|
| B (cm²) | 9233 |
| V' (cm) | 119,16 |
| V (cm) | 55,5 |
| I_G (cm⁴) | 28057637,33 |
| ρ (%) | 45,67 |

Tableau 2.3. Caractéristiques géométriques de la poutre médiane+hourdis

2.14.3. Caractéristiques géométriques de la section en travée

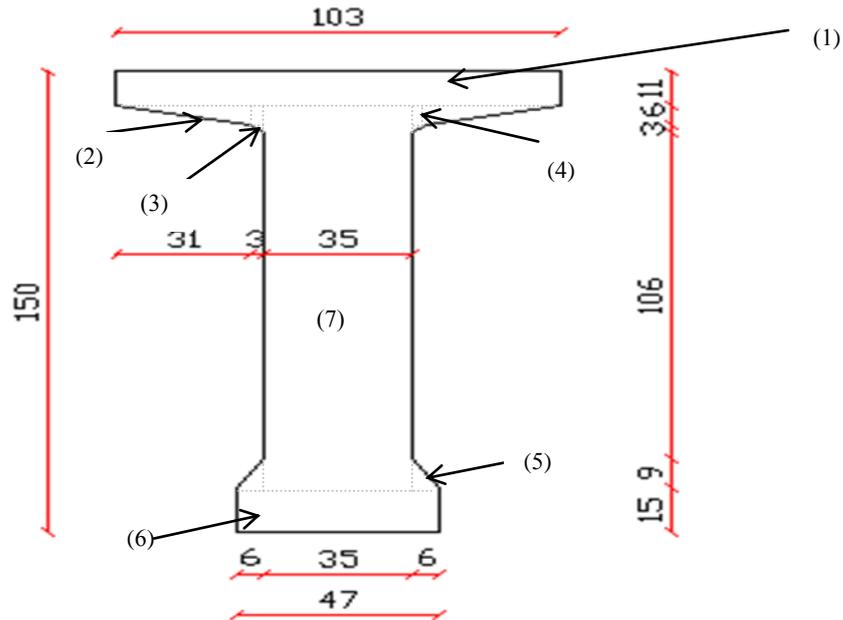


Figure 2.5. Dimensions de la poutre en travée

| Section | Dimension (cm) | B (cm ²) | Z (cm) | I ₀ (cm ⁴) | I (cm ⁴) |
|---------|----------------|----------------------|--------|-----------------------------------|------------------------|
| (1) | 103×11 | 1133 | 144,5 | 11424,416 | 2,3668×10 ⁷ |
| (2) | ((31×6)/2) × 2 | 186 | 137 | 372 | 3491406 |
| (3) | ((3×3)/2) × 2 | 9 | 132 | 4,5 | 156820,5 |
| (4) | (3×6) × 2 | 36 | 136 | 108 | 665964 |
| (5) | ((6×9)/2) × 2 | 54 | 18 | 243 | 17739 |
| (6) | 47×15 | 705 | 7,5 | 13218,75 | 52875 |
| (7) | 35×124 | 4340 | 77 | 5560986,66 | 3,1292×10 ⁷ |

Tableau 2.4. Calcul des données géométriques de la poutre en travée

On a: $I = I_0 + Z^2 \times B(\text{section})$

Et :
$$V' = \frac{\sum S/axe}{\sum B} = \frac{535724}{6463} = 82,9 \text{ cm}$$

Avec: $S = B \times Z$

$V = h - V' = 150 - 82,9 = 67,1 \text{ cm}$

Etude du tablier

$$I_G = I-B \times V'^2 = 59345651,16 - 6463 \times 82,9^2 = 14929265,33 \text{ cm}^4$$

$$\rho = I_G / (B \times V \times V') = 0,415 = 41,52\%$$

| | |
|---------------------------------------|-------------|
| B (cm²) | 6463 |
| V' (cm) | 82,9 |
| V (cm) | 67,1 |
| I_G (cm⁴) | 14929265,33 |
| ρ (%) | 41,52 |

Tableau 2.5. Caractéristiques géométriques de la poutre en travée

2.14.4. Caractéristiques géométriques de la section en travée + hourdis

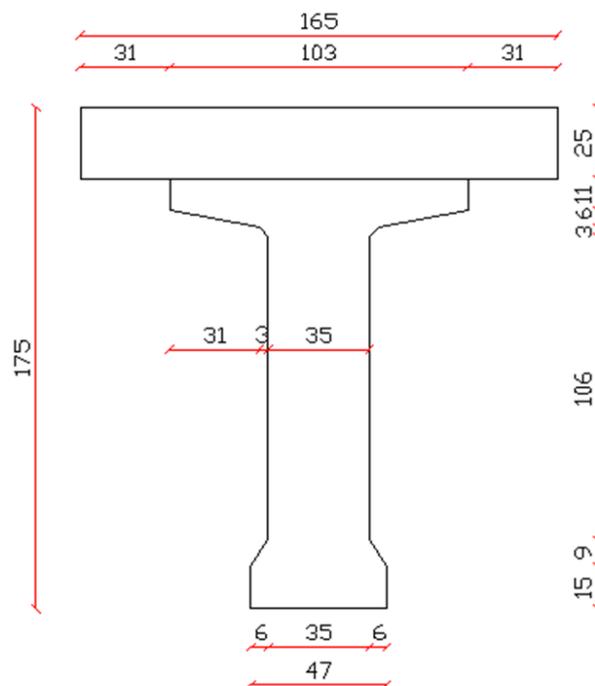


Figure 2.6. Dimensions de la poutre+hourdis en travée

$$V' = \frac{\sum S/axe}{\sum B} = \frac{1206036,5}{10588} = 113,90 \text{ cm}$$

$$V = h - V' = 175 - 113,90 = 61,1 \text{ cm}$$

$$I_G = I-B \times V'^2 = 168486276,2 - 10588 \times 113,90^2 = 31125928,68 \text{ cm}^4$$

$$\rho = I_G / (B \times V \times V') = 0,4224 = 42,24\%$$

| | |
|---------------------------------------|-------------|
| B (cm²) | 10588 |
| V' (cm) | 113,90 |
| V (cm) | 61,1 |
| I_G (cm⁴) | 31125928,68 |
| ρ (%) | 42,24 |

Tableau 2.6. Caractéristiques géométriques de la poutre+hourdis en travée

2.14.5. Caractéristiques géométriques de la section à l'about

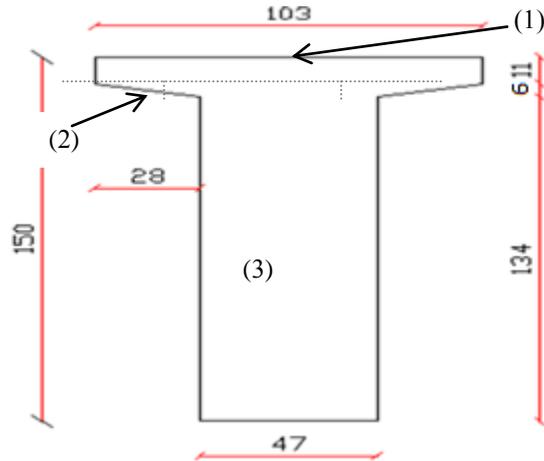


Figure 2.7. Dimensions de la poutre à l'about

| Section | Dimension (cm) | B (cm ²) | Z (cm) | I ₀ (cm ⁴) | I (cm ⁴) |
|---------|----------------|----------------------|--------|-----------------------------------|-------------------------|
| (1) | 103×11 | 1133 | 144,5 | 11424,416 | 2,3668x10 ⁷ |
| (2) | ((28×6)/2) × 2 | 168 | 274 | 336 | 12613104 |
| (3) | 47×139 | 6533 | 68,5 | 1,0518x10 ⁷ | 4,11731x10 ⁷ |

Tableau 2.7. Calcul des données géométriques de la poutre à l'about

On a: $I = I_0 + Z^2 \times B$ (section)

Et : $V' = \frac{\sum S/axe}{\sum B} = \frac{657261}{7834} = 83,89 \text{ cm}$

Avec: $S = B \times Z$

$V = h - V' = 150 - 83,89 = 66,11 \text{ cm}$

$I_G = I - B \times V'^2 = 77454247,67 - 7834 \times 83,89^2 = 22322221,2 \text{ cm}^4$

$\rho = I_G / (B \times V \times V') = 0,513 = 51,37\%$

| | |
|---------------------------------------|------------|
| B (cm²) | 7834 |
| V' (cm) | 83,89 |
| V (cm) | 66,11 |
| I_G (cm⁴) | 22322221,2 |
| ρ (%) | 51,37 |

Tableau 2.8. Caractéristiques géométriques de la poutre à l'about

2.14.6. Caractéristiques géométriques de la section à l'about + hourdis

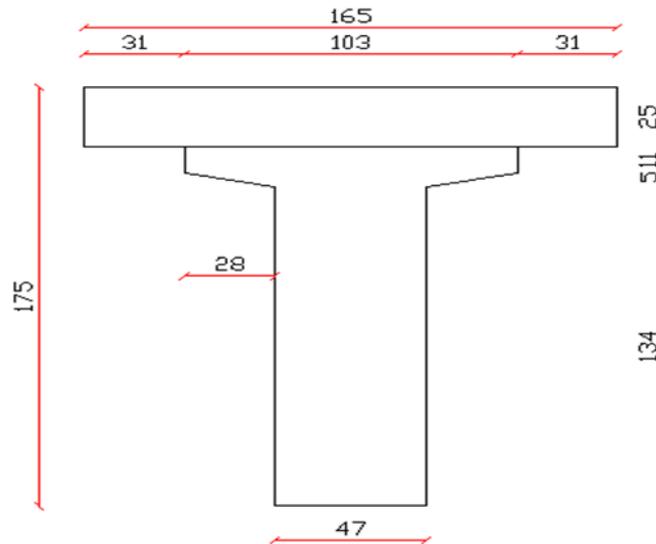


Figure 2.8. Dimensions de la poutre+hourdis à l'about

$$V' = \frac{\sum S/axe}{\sum B} = \frac{1327573,5}{11959} = 111,01 \text{ cm}$$

$$V = h - V' = 175 - 111,01 = 64 \text{ cm}$$

$$I_G = I - B \times V'^2 = 186594872,7 - 11959 \times 111,01^2 = 39221483,49 \text{ cm}^4$$

$$\rho = I_G / (B \times V \times V') = 0,4616 = 46,16\%$$

| | |
|---------------------------------------|-------------|
| B (cm²) | 11959 |
| V' (cm) | 111,01 |
| V (cm) | 64 |
| I_G (cm⁴) | 39221483,49 |
| ρ (%) | 46,16 |

Tableau 2.9. Caractéristiques géométriques de la poutre à l'about

3. CHARGES ET SURCHARGES

3.1. Introduction

Il s'agit d'étudier les différentes charges qui agissent sur le tablier car le pont a une fonction porteuse, elles sont classées en deux catégories :

- Les charges permanentes
- Les surcharges

3.2. Calcul des charges permanentes

Poutres, dalle, revêtement de la chaussée, corniche plus trottoirs, garde-corps.

Etude du tablier

| Eléments | Données | Formules | Résultats | Commentaire |
|----------------------------------|--|--|---------------------|--|
| Poutre | $\gamma_b=2,5t/m^3$ $S_1=0,51m^2$ $S_2=0,61m^2$ $S_3=1,781m^2$ $l_1=18,50m$ $l_2=6,70m$ $l_3=0,78m$ $N=6$ | $g_1=\gamma_b \times N(S_1 l_1 + 2S_2 l_2)$ | $g_1=264,135t$ | γ_b : masse volumique du béton S_i : surface des différentes surfaces de la poutre L_i : longueur de la partie i de la poutre |
| Dalle | $e_d=0,25m$ $L_d=10,00m$ $\gamma_b=2,5t/m^3$ $l=33,40m$ | $g_2=e_d \times L_d \times \gamma_b \times l$ | $g_2=208,75t$ | e_d : épaisseur de la dalle |
| Revêtement de la chaussée | $e_r=0,085m$ $L_r=7,5m$ $l=33,40m$ $\gamma_b=2,2t/m^3$ | $g_3= e_r \times l_r \times L_r \times \gamma_b$ | $g_3=46,84t$ | e_r : épaisseur du revêtement |
| Corniches | $l=33,40m$ $\gamma_c=1,12t/m^3$ | $g_4= 2 \times l \times \gamma_c$ | $g_4=74,816t$ | |
| Garde-corps | $l=33,40m$ $\gamma_g=0,1t/m^3$ | $g_5=2 \times l \times \gamma_g$ | $g_5=6,68t$ | |
| Entretoise | $e_e=0,3m$ $S_e=1,05m$ $\gamma_b=2,5t/m^3$ $N=5$ | $g_6=N \times S_e \times e_e \times \gamma_b$ | $g_6=3,937t$ | e_e : épaisseur de l'entretoise |
| Charge totale | | $G=\sum g_i$ | $G=605,158t/travée$ | |

Tableau 2.10. Charges permanentes

3.3. Calcul des surcharges

D'après le fascicule 61 du document technique réglementaire (D.T.R), les surcharges utilisées pour le dimensionnement du tablier sont les suivantes :

- Surcharge A (L).
- Système B_c.
- Système B_t.
- Système B_r.
- Surcharge militaire MC120.
- Charge exceptionnelle D240.
- Surcharges sur trottoirs.
- Surcharges dues au vent et au séisme.
- Efforts de freinage.

Etude du tablier

Sachant que :

La largeur roulable est définie comme étant la largeur comprise entre les bordures ; elle est de 7,5m (2×3,75).

D'après le fascicule 61 titre II, On distingue trois classes de ponts, en fonction de leur largeur roulable les suivantes :

| La classe | La largeur roulable |
|-----------|-------------------------------------|
| 1 | $Lr \geq 7 \text{ m}$ |
| 2 | $5,50 \text{ m} < Lr < 7 \text{ m}$ |
| 3 | $Lr < 5,50 \text{ m}$ |

Tableau 2.11. Classe de pont(5)

Le pont supporte une chaussée de largeur roulable égale à 7,5m, il est donc de première classe.

– Système de charge A(L)

La chaussée du pont supporte une charge uniformément répartie A(L) employé pour la stabilité d'ensemble d'une structure

$$A(L) = 230 + \frac{36000}{L + 12} \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

$$A(L) = 230 + \frac{36000}{33,80+12} = 1016,026 \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

La valeur A(L) est multiplié par les coefficients a_1 et a_2 .

- Le coefficient a_1 est obtenu à partir du tableau en fonction de la classe du pont et du nombre de voies chargées :

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

Tableau 2.12. Les valeurs du coefficient a_1 (5)

D'après le tableau : $a_1 = 1$

- $a_2 = V_0 / V$

V: la largeur d'une voie ; V_0 : valeur donnée par le tableau

| Classe de pont | V_0 |
|------------------|--------|
| Première classe | 3,5 m |
| Deuxième classe | 3,0 m |
| Troisième classe | 2,75 m |

Tableau 2.13. Les valeurs de V_0 (5)

$$a_2 = 3,5 / 3,75 = 0,933$$

Etude du tablier

$$A(L)_{\text{final}} = A(L) \times a_1 \times a_2 = 947,952 \text{ [kg/ m}^2\text{]} = 0,947 \text{ [t/ m}^2\text{]}$$

– **Surcharge B :**

Le système de charge B comprend trois systèmes distincts, leur charge est multipliée par le coefficient de majoration dynamique :

• **Système Bc :**

Il se compose de camions type comportant trois essieux. Dans le sens longitudinal le nombre de camions par file est égal à deux. Dans le sens transversal on dispose sur la chaussée autant de files de camions que la chaussée comporte de voie de circulation et on place toujours ces files dans la situation la plus défavorable, comme le montre la figure suivante :

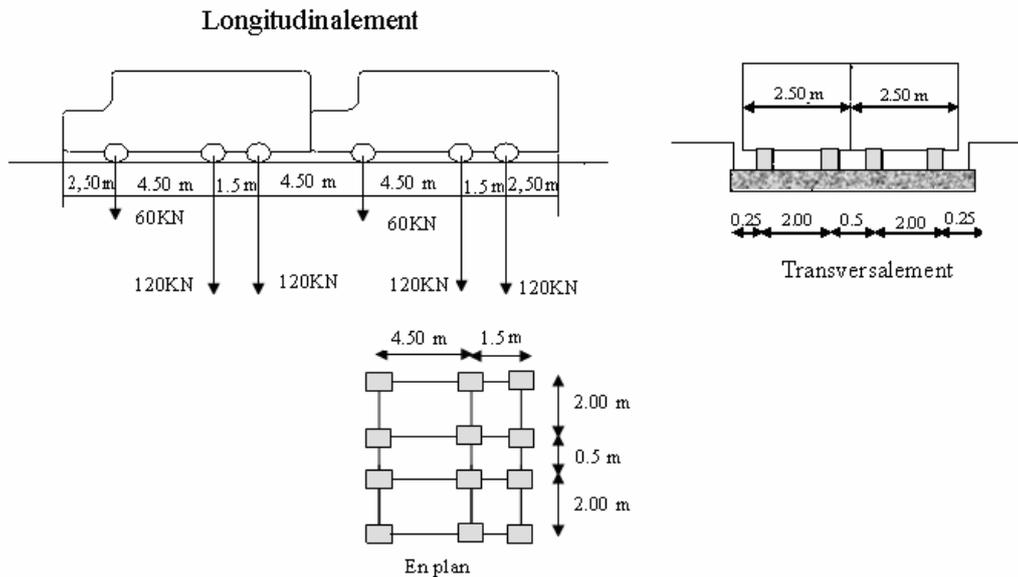


Figure 2.9. Le système Bc(5)

La valeur des charges du système Bc sont multipliées par les coefficients b_c obtenus à partir du tableau :

Tableau les valeurs du coefficient b_c

| Nombre de voies chargées | | 1 | 2 | 3 | 4 | ≥ 5 |
|--------------------------|-----------|------|------|------|------|----------|
| Classe de pont | Première | 1,20 | 1,10 | 0,95 | 0,80 | 0,70 |
| | Deuxième | 1,0 | 1,0 | 0,95 | 0,80 | 0,70 |
| | Troisième | 1,0 | 0,80 | 0,95 | 0,80 | 0,70 |

Tableau 2.14. Les valeurs du coefficient $b_c(5)$

D'après le tableau : $b_c = 1,1$

On peut placer 2x2 camions (2 longitudinal et 2 transversal)

Etude du tablier

Le poids d'un camion est : 30 t

Soit : $Bc=30 \times 4=120 \text{ t} \longrightarrow S= Bc \times b_c=120 \times 1,1=132 \text{ t}=1320 \text{ kn}$

Le coefficient de majoration dynamique sera égal à :

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \times L} + \frac{0,6}{1 + 4 \times G/S}$$

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} L : \text{longueur de la travée} \\ G : \text{poids total des charges permanentes} \\ S : \text{poids maximum des surcharges} \\ \quad \text{que peut supporter l'hourdis} \end{array} \right.$

$\delta = 1,083$

Bc final = $S \cdot \delta = 142,956 \text{ t}$

- **Système Bt :**

Il se compose de de deux essieux tandems, comme le montre la figure suivante :

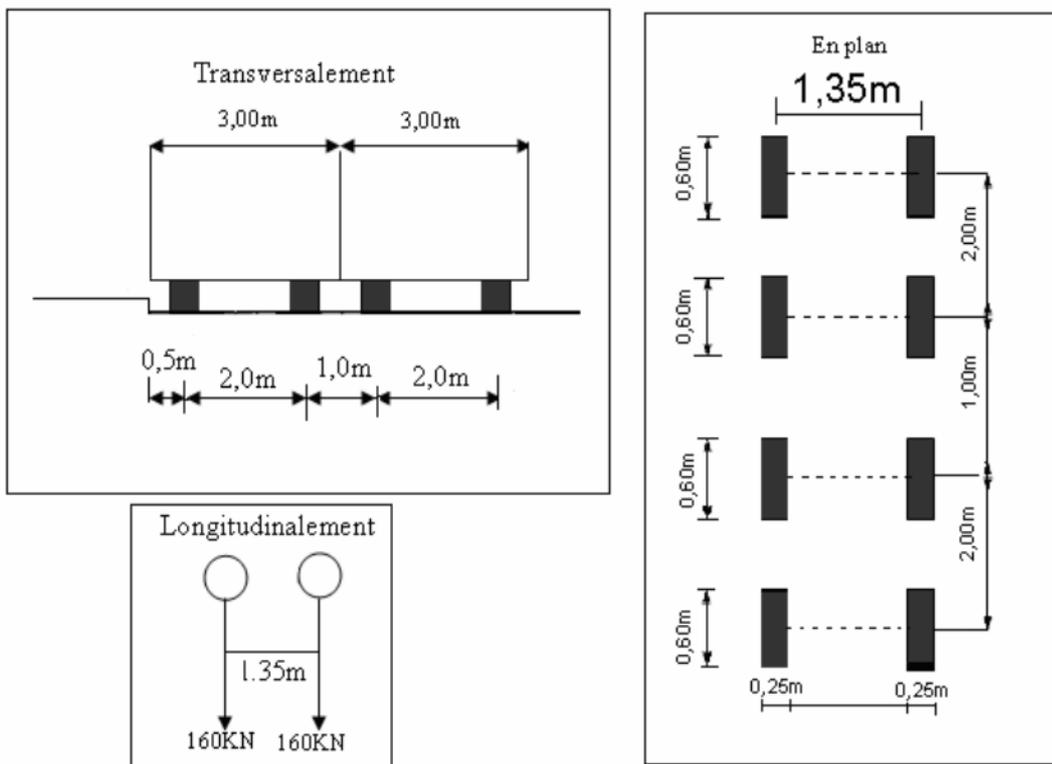


Figure 2.10. Le système Bt(5)

La valeur des charges du système Bt sont multipliées par le coefficient b_t obtenu à partir du tableau :

| Classe de pont | b_t |
|-----------------|-------|
| Première classe | 1,2 |
| Deuxième classe | 1 |

Tableau 2.15. Les valeurs du coefficient $b_t(5)$

Etude du tablier

$b_t=1$

Le poids d'un essieu tandem est de 32 t

Donc : $B_t=32 \cdot 2=64 \text{ t}=640 \text{ kn}$

Le coefficient de majoration dynamique sera égal à :

$$\delta = 1,067$$

$B_t \text{ final} = S \cdot \delta = 68,288 \text{ t}$

- **Système Br :**

Il se compose d'une roue qui porte une charge de 100 kn, comme le montre la figure suivante :

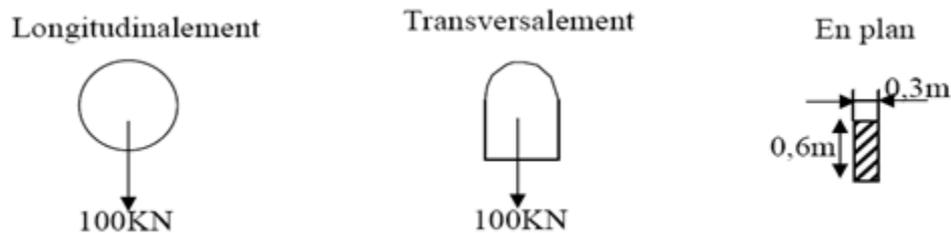


Figure 2.11. Le système Br(5)

Le coefficient de majoration dynamique sera égale à :

$$\delta = 1,054$$

$Br \text{ final} = S \cdot \delta = 10,54 \text{ t}$

- **Surcharge militaire Mc120**

Les véhicules types militaires sont souvent plus défavorables que les systèmes A et B pour les éléments de couverture et d'ossature des tabliers, on distingue particulièrement le convoi M_{C120} qui comporte deux chenilles.

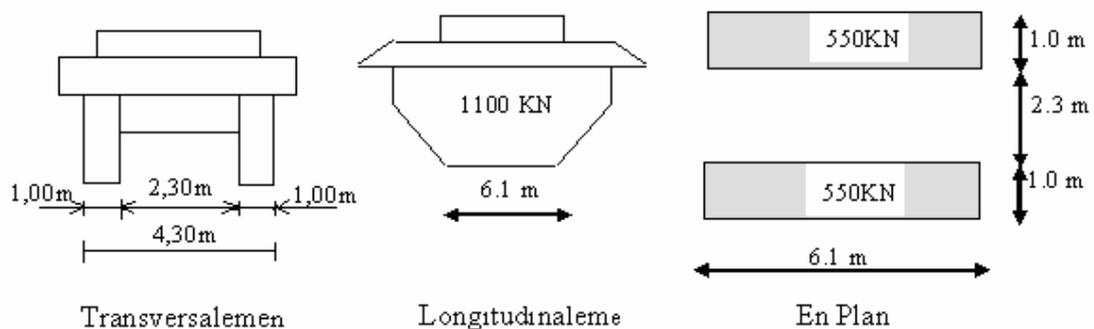


Figure 2.12. Surcharge Mc120(5)

Charge total des chenilles : 1100 kn

Etude du tablier

Le coefficient de majoration dynamique sera égale à :

$$\delta = 1,078$$

$$Mc_{120 \text{ final}} = S \cdot \delta = 118,60t$$

- **Charge exceptionnelle D240**

Il comporte une remorque de trois éléments de quatre lignes à deux essieux de 240 t de poids total.

Ce poids est supposé reparti au niveau de la chaussée sur un rectangle uniformément chargé de 3,20m de large et de 18,60m de long.

$$D240 = \frac{2400}{18,6 \times 3,20} = 40,32 \text{ t}$$

- **Charge exceptionnelle D280**

Il comporte deux remorques supportant chacune 1400 kn ; dont le poids est supposé réparti au niveau de la chaussée sur un rectangle chargé de 3,30m de large et de 11m de long.

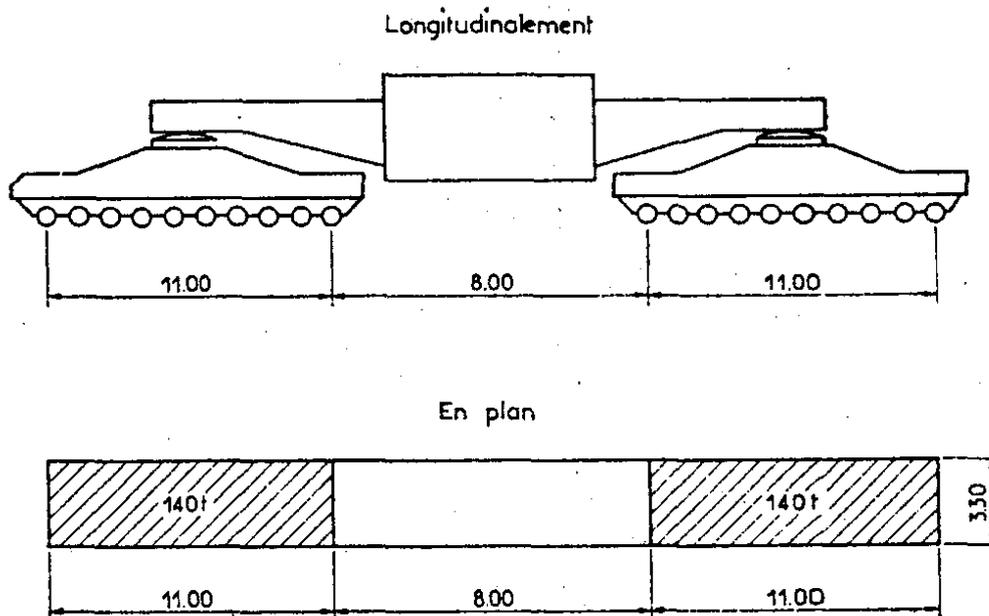


Figure 2.13. Surcharge D280(5)

$$S = 1400 \times 2 = 2800 \text{ KN}$$

Le coefficient de majoration dynamique sera égal à :

$$\delta = 1,114$$

$$D280 = S \cdot \delta = 311,92t$$

- **Surcharge de trottoirs**

C'est une charge uniformément répartie de 150kg/m², elles ne sont pas frappés de majoration pour effets dynamique.

Charges générales : 150 kg/m²

Deux trottoirs chargés : $2 \times 0,15 \times 1,25 = 0,375 \text{ t/ml}$

- **Efforts de freinage**

- **Due à A(L)**

$$HF(A(L)) = \frac{S \cdot A(L)_{final}}{20 + 0,0035 \cdot S}$$

S : surface chargée = $7,5 \times 33,40 = 250,5 \text{ m}^2$

$HF(A(L)) = 11,36 \text{ t}$

- **Due à Bc**

C'est le poids d'un camion supposé freiner donc :

$HF(Bc) = 30 \text{ t}$

4. DETERMINATION DES MOMENTS ET DES EFFORTS

4.1. La méthode numérique (sap 2000)

SAP 2000 est un logiciel de calcul et de conception des structures d'ingénierie

Particulièrement adapté aux bâtiments et ouvrages de génie civil, il permet en un même environnement la saisie graphique des ouvrages de BTP avec une bibliothèque d'éléments autorisant l'approche du comportement de ce type de structure.

4.2. La modélisation

Etant donné que l'ouvrage est isostatique avec six travées indépendantes, on étudiera une seule travée (une dalle de 25cm d'épaisseur avec 6 poutres).

Les poutres sont considérées comme un élément FRAME, elles sont appuyées sur un appui simple d'un côté (pile) et de l'autre côté sur un appui double (culée), la dalle et l'entretoise sont définies comme des éléments SHELL.

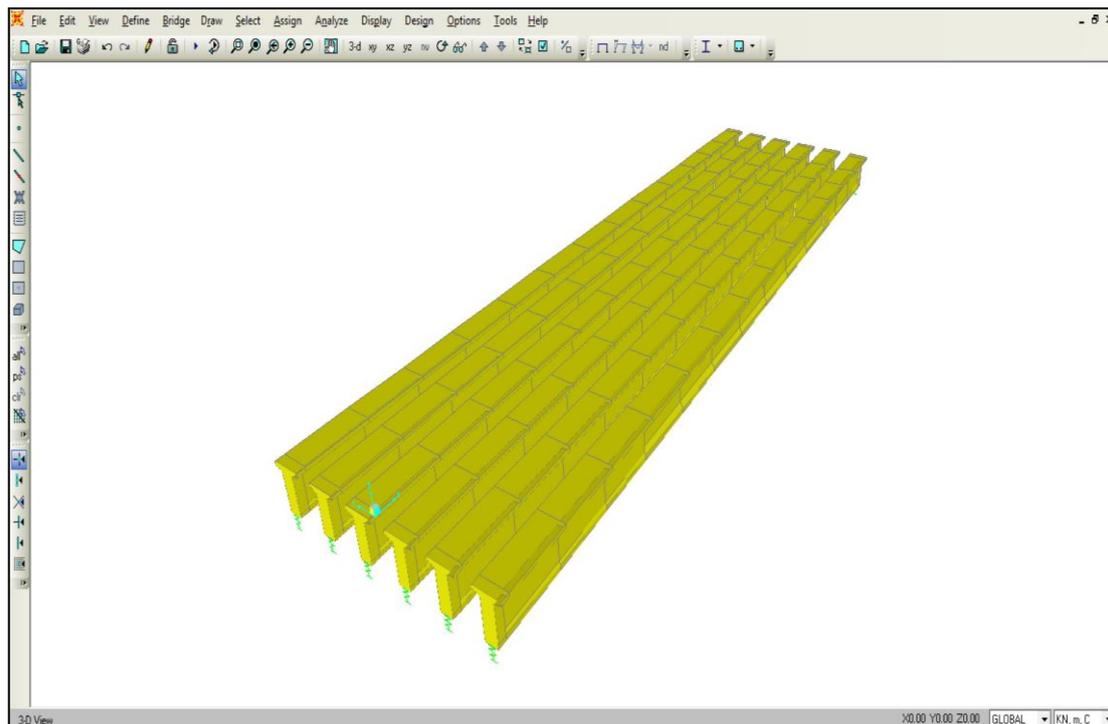


Figure 2.14. Modélisation des poutres

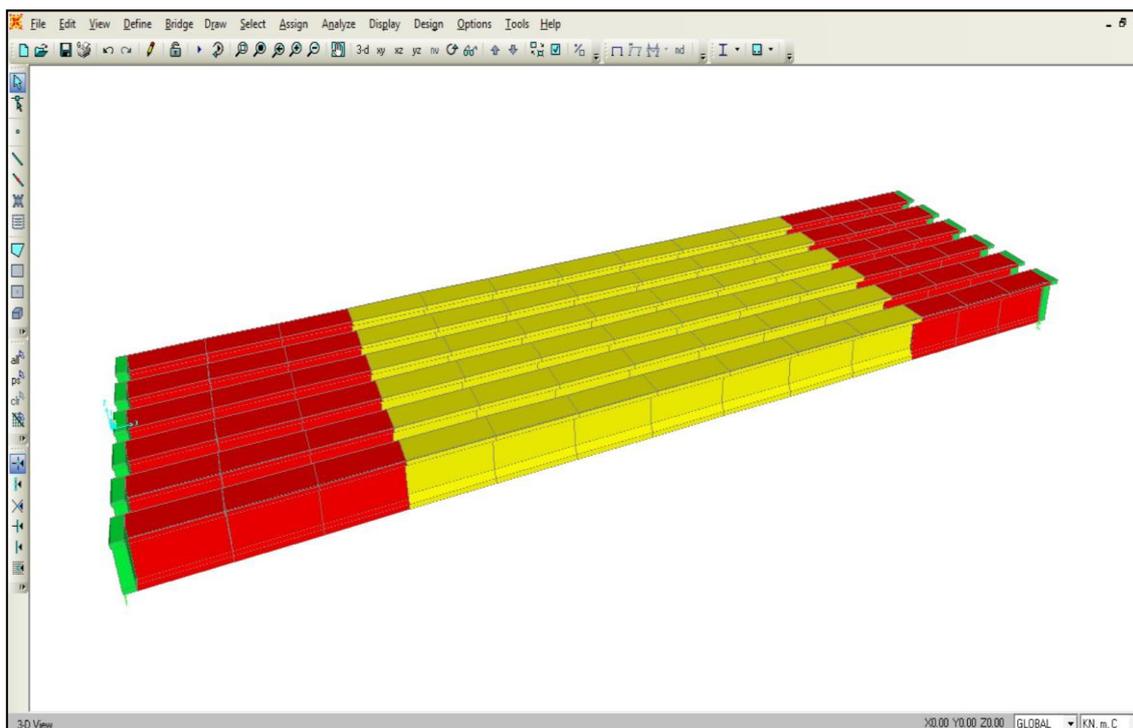


Figure 2.15. Modélisation des poutres avec leurs différentes sections

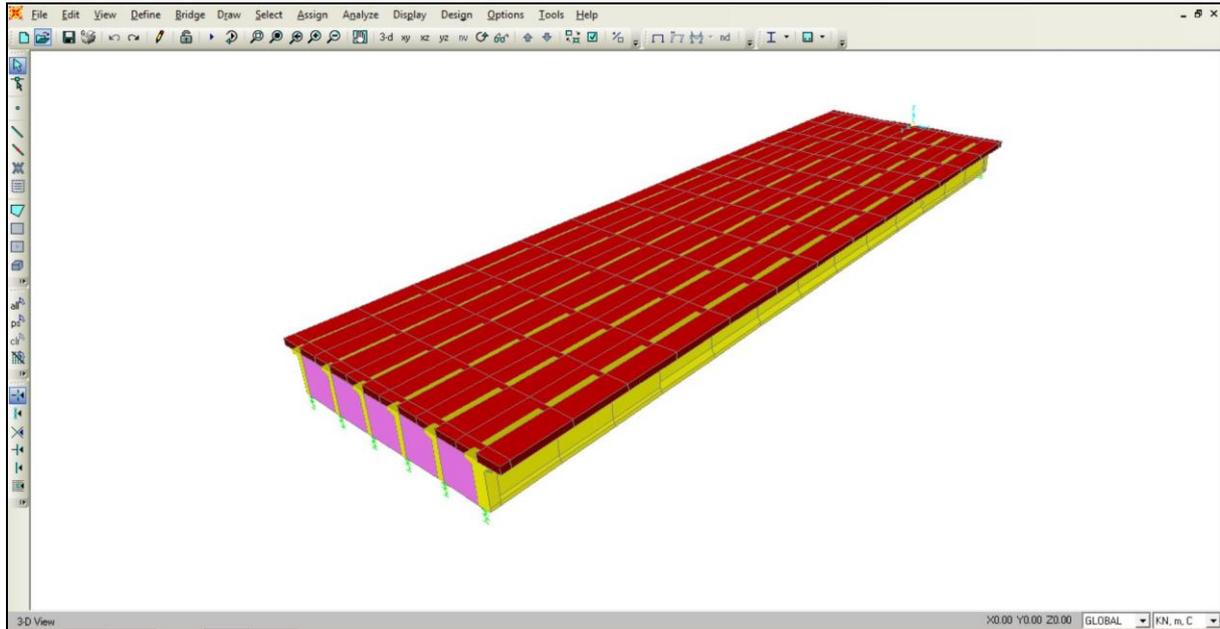


Figure 2.16. Modélisation de la dalle et de l'entretoise

4.3. Moments fléchissant dans les poutres

4.3.1. Moments fléchissant due au poids propre (Dead)

Suite à la modélisation du tablier avec logiciel SAP2000, On a trouvé les résultats présentés sous forme du diagramme suivant :

- **Poutre de rive**

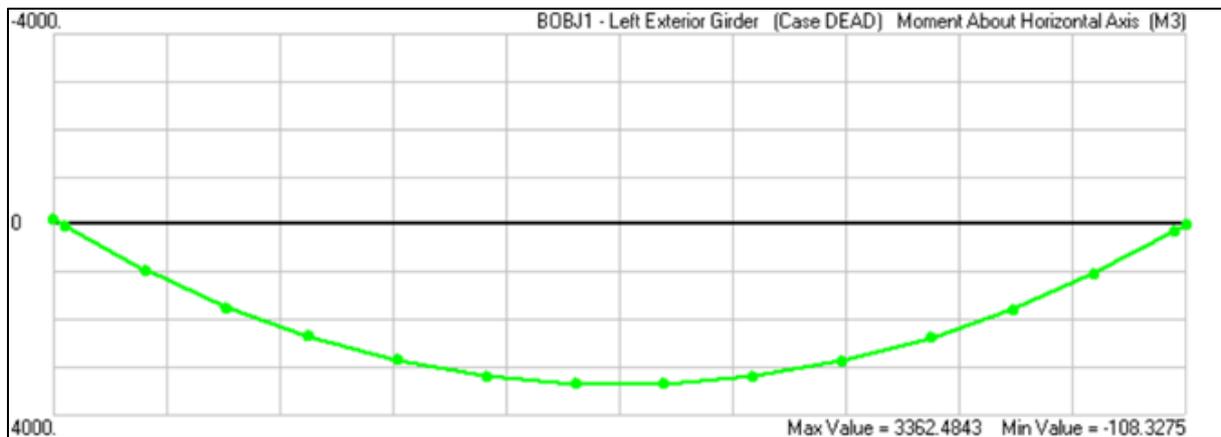


Figure 2.17. Diagramme du moment fléchissant [KN.m] de la poutre de rive

- **Poutre intermédiaire 1**

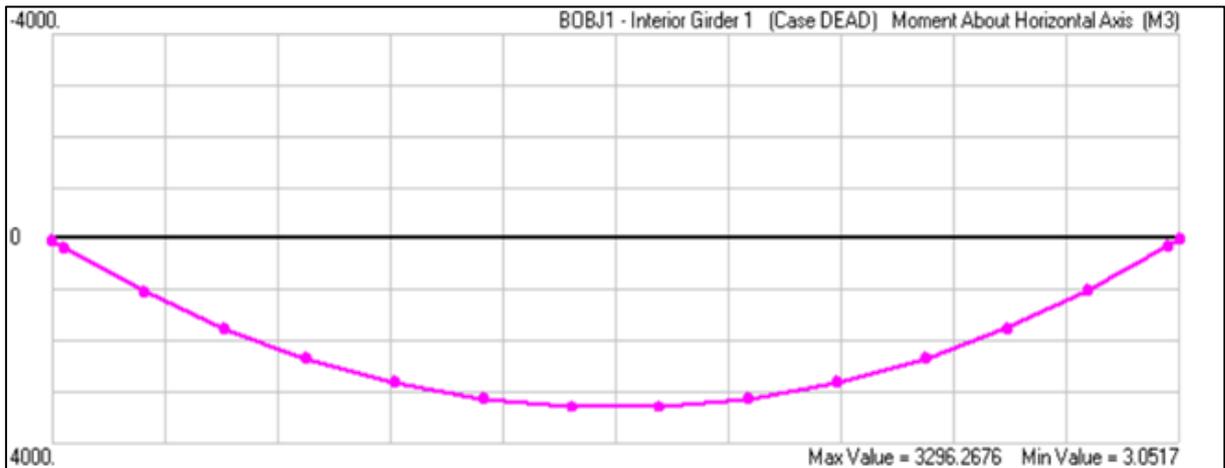


Figure 2.18. Diagramme du moment fléchissant [KN.m] de la poutre intermédiaire 1

- **Poutre intermédiaire 2**

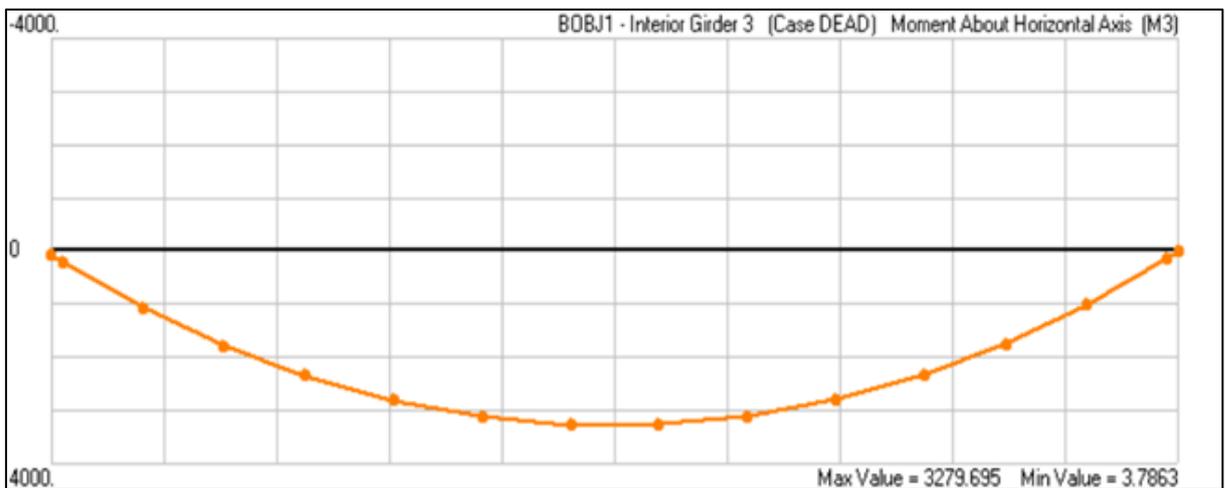


Figure 2.19. Diagramme du moment fléchissant [KN.m] de la poutre intermédiaire 2

4.3.2. Moments fléchissant due à la surcharge A(I)

- **Poutre de rive**

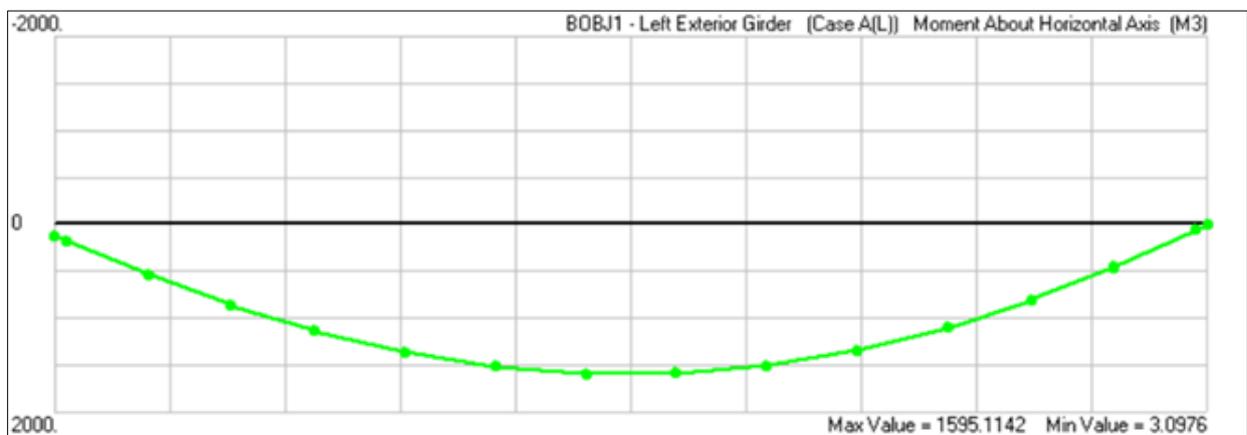


Figure 2.20. Diagramme du moment de la poutre de rive due à A(L)

- **Poutre intermédiaire 1**

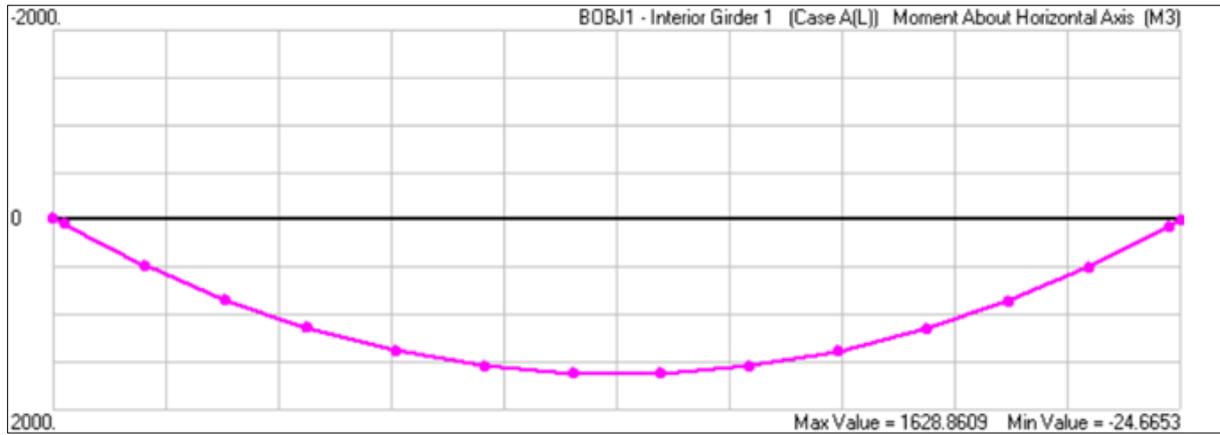


Figure 2.21. Diagramme du moment de la poutre intermédiaire 1 due à A(L)

- **Poutre intermédiaire 2**

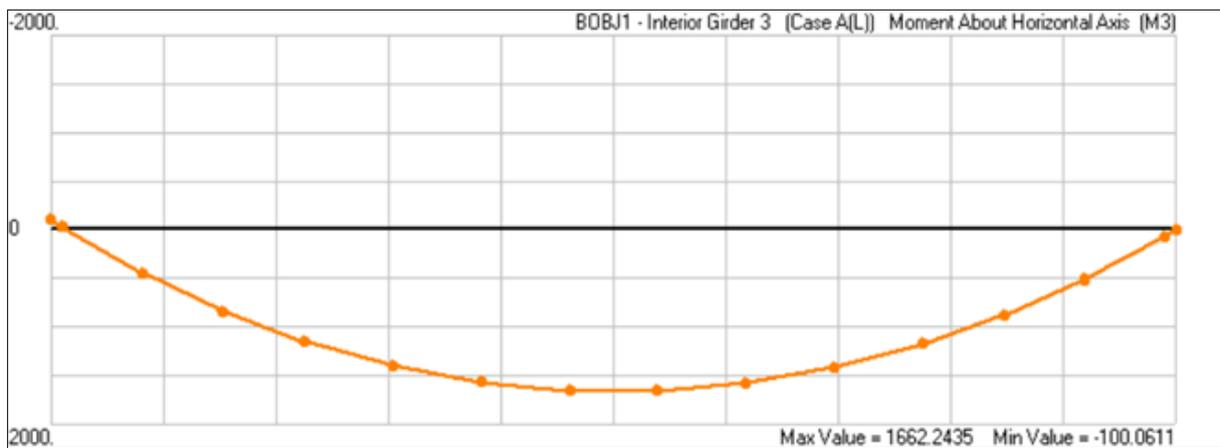


Figure 2.22. Diagramme du moment de la poutre intermédiaire 2 due à A(L)

Etude du tablier

Nous avons résumé tout les resultats dans les tableaux suivants :

| Cas de charge | | Moments de la poutre de rives [KN.m] | Moments de la poutre intermédiaire 1 [KN.m] | Moments de la poutre intermédiaire 2 [KN.m] |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------------|---|---|
| Charges permanente | | 3362,48 | 3296,26 | 3279,69 |
| Surcharge A(l) | | 1595,11 | 1628,86 | 1662,24 |
| Surcharge Bc | Centré | 1130,17 | 1280,08 | 1407,34 |
| | Excentré | 1253,26 | 1308,59 | 1248,02 |
| Surcharge Bt | Centré | 73,73 | 94,23 | 105,63 |
| | Excentré | 84,46 | 98,23 | 91,28 |
| Surcharge Mc120 | Centré | 1261,31 | 1542,97 | 1633,08 |
| | Excentré | 851,14 | 1134,75 | 1523,00 |
| Surcharge D280 | Centré | 562,80 | 616,97 | 677,62 |
| | Excentré | 444,61 | 451,65 | 556,99 |

Tableau 2.16. Tableau récapitulatif des moments fléchissant

4.3.3. Valeur des moments fléchissant réels

Pour la détermination des sollicitations maximum (M, N, T) on prend en considération les combinaisons d'actions selon BPEL.

| Action | ELU | ELS |
|-----------------------------------|------|-----|
| Charge permanent | 1,35 | 1 |
| Surcharge A(l) | 1,6 | 1,2 |
| Surcharge Bc | 1,6 | 1,2 |
| Surcharge Bt | 1,6 | 1,2 |
| Surcharge Mc₁₂₀ | 1,35 | 1 |
| Surcharge D₂₈₀ | 1,35 | 1 |
| Surcharge de trottoir | 1,5 | 1 |

Tableau 2.17. Coefficients des combinaisons d'actions

Les résultats des moments fléchissant d'après l'application des coefficients des combinaisons d'action (voir tableau 3.17.) sont présentés dans les tableaux suivants :

Etude du tablier

4.3.4. Moments fléchissant à l'état limite ultime (ELU)

| Combinaison d'action | Moments de la poutre de rives [KN.m] | Moments de la poutre intermédiaire 1 [KN.m] | Moments de la poutre intermédiaire 2 [KN.m] |
|---|--------------------------------------|---|---|
| 1,35G+1,5Q+1,6A(l) | 7105,20 | 7070,10 | 7101,30 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bc(centré) | 7608,02 | 7623,61 | 7718,91 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bc(excentré) | 7809,15 | 7669,23 | 7466,71 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bt(centré) | 5934,02 | 5725,88 | 5645,97 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bt(excentré) | 5951,27 | 5732,23 | 5623,43 |
| 1,35G+1,5Q+1,35Mc ₁₂₀ (centré) | 7515,76 | 7656,57 | 7726,35 |
| 1,35G+1,5Q+1,35Mc ₁₂₀ (excentré) | 8410,21 | 8117,54 | 7783,19 |
| 1,35G+1,5Q+1,35D ₂₈₀ (centré) | 6574,23 | 6406,54 | 6379,50 |
| 1,35G+1,5Q+1,35D ₂₈₀ (excentré) | 7014,49 | 6660,02 | 6399,85 |

Tableau 2.18. Tableau récapitulatif des moments à l'ELU

4.3.5. Moments fléchissant à l'état limite de service (ELS)

| Combinaison d'action | Moments de la poutre de rives [KN.m] | Moments de la poutre intermédiaire 1 [KN.m] | Moments de la poutre intermédiaire 2 [KN.m] |
|----------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| G+Q+1.2A(l) | 5286,92 | 5261,38 | 5291,90 |
| G+Q+1.2Bc(centré) | 5652,28 | 5666,08 | 5738,49 |
| G+Q+1.2Bc(excentré) | 5803,00 | 5700,02 | 5549,32 |
| G+Q+1.2Bt(centré) | 4396,66 | 4242,78 | 4183,76 |
| G+Q+1.2Bt(excentré) | 4409,60 | 4247,55 | 4166,85 |
| G+Q+Mc ₁₂₀ (centré) | 5567,23 | 5671,53 | 5723,22 |
| G+Q+Mc ₁₂₀ (excentré) | 6229,78 | 6012,99 | 5765,33 |
| G+Q+D ₂₈₀ (centré) | 4869,80 | 4745,58 | 4869,80 |
| G+Q+D ₂₈₀ (excentré) | 5195,91 | 4997,41 | 4740,63 |

Tableau 2.19. Tableau récapitulatif des moments à l'ELS

4.4. Efforts tranchants dans les poutres

4.4.1. Efforts tranchants due au poids propre

- **Poutre de rive**

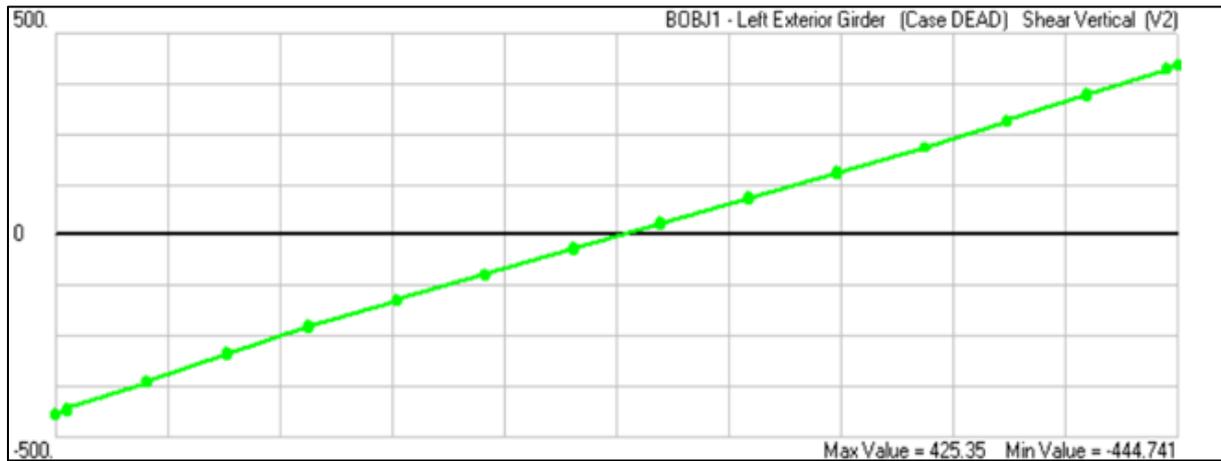


Figure 2.23. Diagramme de l'effort tranchant [KN.m] de la poutre de rive

- **Poutre intermédiaire 1**

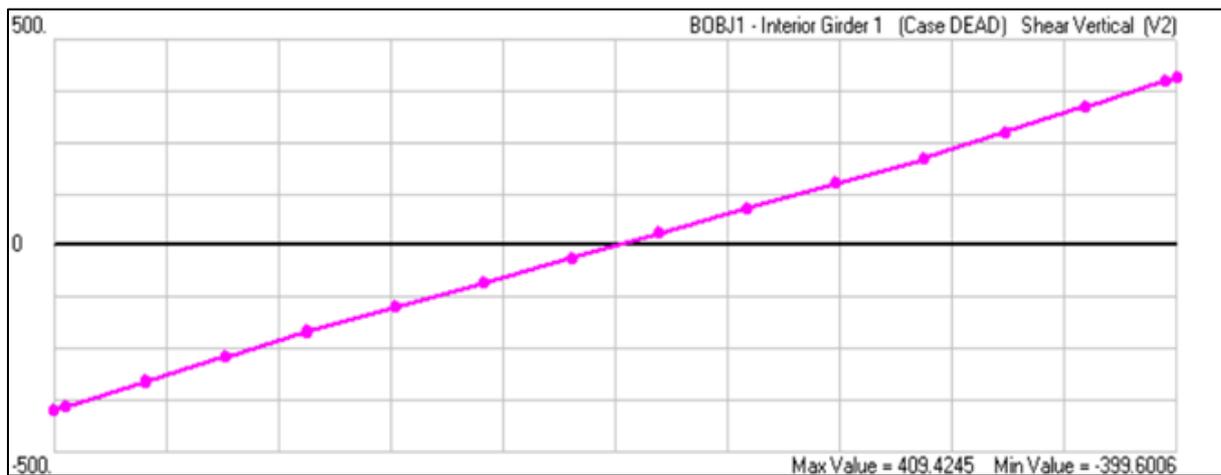


Figure 2.24. Diagramme de l'effort tranchant [KN.m] de la poutre intermédiaire 1

- **Poutre intermédiaire 2**

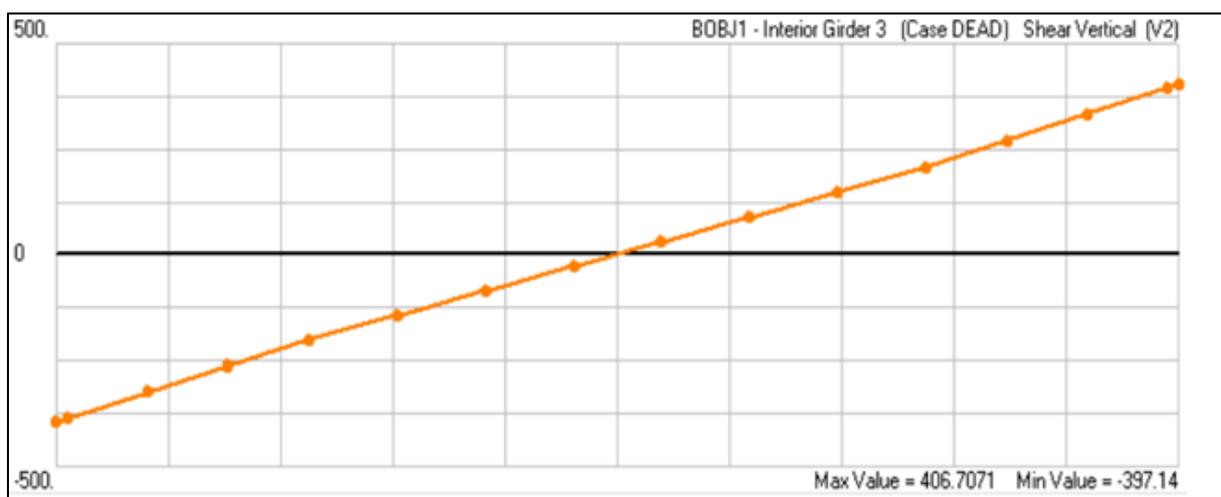


Figure 2.25. Diagramme de l'effort tranchant [KN.m] de la poutre intermédiaire 2

Etude du tablier

Nous avons résumé tout les resultats dans les tableaux suivants :

| Cas de charge | | Moments de la poutre de rive [KN.m] | Efforts de la poutre intermédiaire 1 [KN.m] | Efforts de la poutre intermédiaire 2 [KN.m] |
|--------------------|----------|-------------------------------------|---|---|
| Charges permanente | | 425,3 | 409,4 | 406,7 |
| Surcharge A(l) | | 195,1 | 226,4 | 235,3 |
| Surcharge Bc | Centré | 106,7 | 182 | 265,7 |
| | Excentré | 161,9 | 25,24 | 146,2 |
| Surcharge Bt | Centré | 7,2 | 16,4 | 20,3 |
| | Excentré | 9,6 | 22,3 | 11,1 |
| Surcharge Mc120 | Centré | 126,4 | 252,7 | 279,7 |
| | Excentré | 85,7 | 118,3 | 287,0 |
| Surcharge D280 | Centré | 52,6 | 87,1 | 133,0 |
| | Excentré | 53,6 | 44,2 | 76,7 |

Tableau 2.20. Tableau récapitulatif des efforts tranchants

4.4.2. Effort tranchants à l'état limite ultime (ELU)

| Combinaison d'action | L'effort tranchant dans la poutre de rives [KN.m] | L'effort tranchant dans la poutre intermédiaire 1 [KN.m] | L'effort tranchant dans la poutre intermédiaire 2 [KN.m] |
|---|---|--|--|
| 1,35G+1,5Q+1,6A(l) | 1077,6 | 1035,3 | 1029,10 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bc(centré) | 931,4 | 965,2 | 1077,3 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bc(excentré) | 1021 | 1076,9 | 881,9 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bt(centré) | 776,9 | 699,3 | 684,7 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bt(excentré) | 780,8 | 708,7 | 670 |
| 1,35G+1,5Q+1,35Mc ₁₂₀ (centré) | 936,1 | 1014,2 | 1029,7 |
| 1,35G+1,5Q+1,35Mc ₁₂₀ (excentré) | 1100,1 | 832,7 | 1039,7 |
| 1,35G+1,5Q+1,35D ₂₈₀ (centré) | 833,6 | 790,6 | 831,8 |
| 1,35G+1,5Q+1,35D ₂₈₀ (excentré) | 923,4 | 868,5 | 810,1 |

Tableau 2.21. Tableau récapitulatif des efforts à l'ELU

4.4.3. Efforts tranchants à l'état limite de service (ELS)

| Combinaison d'action | L'effort tranchant dans la poutre de rives [KN.m] | L'effort tranchant dans la poutre intermédiaire 1 [KN.m] | L'effort tranchant dans la poutre intermédiaire 2 [KN.m] |
|--|---|--|--|
| 1,35G+1,5Q+1,6A(l) | 801,1 | 770,2 | 765,7 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bc(centré) | 691,4 | 717,7 | 801,9 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bc(excentré) | 758,6 | 801,4 | 655,4 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bt(centré) | 575,6 | 518,2 | 507,5 |
| 1,35G+1,5Q+1,6Bt(excentré) | 578,5 | 525,3 | 496,5 |
| 1,35G+1,5Q+1,35Mc₁₂₀(centré) | 693,4 | 751,2 | 762,7 |
| 1,35G+1,5Q+1,35Mc₁₂₀(excentré) | 809,8 | 815,7 | 770,1 |
| 1,35G+1,5Q+1,35D₂₈₀(centré) | 617,4 | 585,6 | 616,1 |
| 1,35G+1,5Q+1,35D₂₈₀(excentré) | 684,0 | 643,3 | 610,8 |

Tableau 2.22. Tableau récapitulatif des efforts à l'ELS

1. INTRODUCTION

Le béton a pour principal qualité sa bonne résistance à la compression et sa faible résistance à la traction. En 1928 Eugène Freyssinet eu une idée révolutionnaire en permettant au béton de ne travailler qu'en compression. Il venait d'inventer le béton précontraint.

2. PRINCIPE DE LA PRECONTRAINTE

Un ouvrage en béton est dit en béton précontraint quand il est soumis à un système d'efforts créés artificiellement pour engendrer des contraintes permanentes, qui composées avec les contraintes dues aux charges extérieures, donnent des contraintes totales comprises entre les limites que le béton peut supporter indéfiniment, en toute sécurité.

Autrement dit, les zones qui doivent subir des tractions créent artificiellement une contrainte de compression préalable (une précontrainte) et ainsi l'effort de traction dangereux n'engendre qu'une décompression du béton ; celui-ci ne risque alors plus de se fissurer à condition que la contrainte de compression préalablement appliquée ne soit pas inférieure à la contrainte de traction en cause(6).

La précontrainte peut se classer en deux catégories :

- Précontrainte par pré tension
- Précontrainte par post tension

3. PRECONTRAINTE PAR POST TENSION

La technique de post tension consiste à prendre appui sur le béton déjà durci pour tendre le câble de précontrainte. L'élément en béton est donc coulé au préalable, avec des réservations pour le passage ultérieur de la précontrainte. Lorsque le béton atteint une résistance suffisante, la précontrainte est enfilée et tendue à l'aide de vérins.

La post tension est très utilisée en ouvrages d'art pour les grandes portées(6).

4. PROCEDE DE PRECONTRAINTE PAR POST TENSION

- Mise en place du coffrage.
- Mise en place des armatures passives (cadres, épingles, étriers, aciers longitudinaux, chaises de support des gaines).
- Mise en place des gaines et fixation solide sur la cage d'armature pour éviter tout déplacement lors du coulage du béton.
- Mise en place d'étanchéité des gaines par collage de rubans adhésifs sur les raccords ou trous accidentels faits lors des travaux.

Etude de la précontrainte

- Mise en place des plaques d'appui et des frottements adjacents aux extrémités des gaines sous l'emplacement future des ancrages.
- Coulage du béton.
- Durcissement du béton pour atteindre la résistance minimum spécifiée par le bureau d'études pour autoriser la mise en tension.
- Durcissement du béton, enfilage des câbles.
- Le blocage se fait par différents systèmes de cales sur une zone de béton fretté.
- L'injection d'un coulis de ciment.

L'ensemble d'un procédé de précontrainte comprend, généralement, les éléments suivants :

- Dispositif d'ancrage: on distingue, principalement, deux types d'ancrage:
- Ancrage actif, situé à l'extrémité de la mise en tension.
- Ancrage passif (ancrage mort), situé à l'extrémité opposée à la mise en tension.
- Les coupleurs: dispositif permettant les prolongements des armatures.
- Matériels de mise en tension: vérins, pompes d'injection, pompe d'alimentation des vérins etc.
- Les accessoires: gaines, tubes d'injection etc.

Les procédés de précontrainte font l'objet de brevet et sont fabriqués par leurs exploitants. Parmi ces procédés, le procédé de Freyssinet qui utilise des câbles composés de fils de $\varnothing 5$, $\varnothing 7$ et $\varnothing 8$ et de torons T13 de 12,7mm et T15 de 15,2mm.

Nous choisirons des câbles 12T15 ayant les caractéristiques suivantes :

- Aire de la section du câble : $A_p=1668\text{mm}^2$
- Diamètre de la gaine $\varnothing 80$ mm.
- Contrainte limite élastique garantie $f_{peg}=1600$ MPA.
- Contrainte limite de rupture garantie $f_{prg}=1860$ MPA.
- Coefficient de frottement angulaire $f=0,2$ rad⁻¹.
- Coefficient de frottement linéaire $\varphi=2.10^{-3}$ m⁻¹.
- Recul d'ancrage $g=6$ mm.
- Relaxation à 1000 heures $\rho=2,5\%$ TBR « très basse relaxation ».
- Module d'élasticité de l'acier de précontrainte : $E_p=190000$ MPA.

5. CALCUL DE LA PRECONTRAINTE

Selon le BPEL(8) nous avons deux forces de précontrainte P_1 qui représente la section sous critique (cas où le fuseau de passage est strictement situé hors de la zone d'enrobage) et P_2 qui représente la section sur critique (cas où le fuseau de passage à une de ses frontières qui coupe la zone d'enrobage), ainsi la valeur minimale de précontrainte est le maximum de P_1 et P_2 .

La classe de vérification de précontrainte est la classe II.

Les caractéristiques géométriques prises en compte sont celles de la poutre avec hourdis à mi-travée :

$$B = 0,9233 \text{ m}^2$$

$$V' = 1,191 \text{ m}$$

$$V = 0,555 \text{ m}$$

$$I_G = 0,28057 \text{ m}^4$$

$$\rho = 45,67 \%$$

L'enrobage $d_i = 1,5 \text{ } \varnothing \text{ gaine}$; $d_i = 0,12 \text{ m}$

$$f_{c28} = 35 \text{ MPa}$$

$$f_{t28} = 2,7 \text{ MPa}$$

On estime les pertes totales à 30% de la précontrainte initiale.

M_{\max} : Moment sous (G+Mc120) = 6229,7 KN.m

M_{\min} : Moment sous poids propre (G) = 3362,48 KN.m

a) Section sous critique

$$P_1 = \frac{\Delta M}{\rho \times H} + B \times \sigma_{ti}$$

Avec : σ_{ti} : contrainte de traction sur la fibre inférieure = $-f_{t28} = -2,7 \text{ Mpa}$

$$\Delta M = M_{\max} - M_{\min} = 2867,22 \text{ KN.m} = 2,8672 \text{ MN.m}$$

$$P_1 = \frac{2,8672}{0,4567 \times 1,75} + 0,9233 \times (-2,7) = 1,09 \text{ MN}$$

b) Section sur critique

$$P_2 = \frac{M_{\max} + \frac{I_G}{V'} \times \sigma_{ti}}{\rho \times V + V' - d'}$$

$$P_2 = \frac{6,229 + \frac{0,28057}{1,191} \times (-2,7)}{0,4567 \times 0,555 + 1,191 - 0,12} = 4,22 \text{ MN}$$

$$P_{\min} = \max(P_1, P_2) = 4,22 \text{ MN}$$

Donc la section est sur critique

$$e_0 = -(V' - d') = -(1,191 - 0,175) = -1,016 \text{ m}$$

- l'excentricité de la première famille de câbles :

V' : poutre seule=0,555m

$d_i = 1,5\phi 80 \text{ mm} = 0,12\text{m}$

$e_0 = -(0,555 - 0,12) = -0,722\text{m}$

- l'excentricité de la deuxième famille de câbles :

V' : poutre avec dalle=1,191m

$d_i = 2\phi 80\text{mm} = 0,16\text{m}$

$e_0 = -(1,191 - 0,16) = -1,031\text{m}$

6. CALCUL DU NOMBRE DE CABLES

On estime les pertes totales à 30% de la précontrainte initiale P_0 , en tenant compte de ces pertes la valeur de précontrainte sera de :

$$P_0 = \frac{P_{min}}{0,98 - 1,2 \times \frac{\Delta P}{P_0}}$$

Avec : $\Delta P = 0,3P_0 = 2,04 \text{ MN}$

$P_0 = 6,80 \text{ MN}$

$$n = \frac{P_0}{P}$$

Avec :

P : précontrainte développée pour un câble

$$P = \sigma_{p0} \times A_p$$

$\sigma_{p0} = \min(0,8 \cdot f_{prg} ; 0,9 \cdot f_{peg}) = \min(1488 ; 1440) = 1440 \text{ Mpa}$

$P = 1440 \times 1,668 \times 10^{-3} = 2,40 \text{ MN}$

$$n = \frac{6,80}{2,40} = 2,83$$

Donc: on prend 3 câbles de 12T15

La nouvelle valeur de la précontrainte :

$P_0 = n \times P = 3 \times 2,40 = 7,20 \text{ MN}$

| Précontrainte P_{min} (MN) | L'excentricité $e_0(\text{m})$ | Nombre de câbles | Précontrainte initiale $P_0(\text{MN})$ |
|---------------------------------|-----------------------------------|------------------|---|
| 4,22 | -1,071 | 3(12T15) | 6,80 |

Tableau 3.1. Récapitulatif des résultats de précontrainte

7. VERIFICATION A L'ELS

On calcule les contraintes caractéristiques :

$$P_1 = 1,02P_0 - 0,8\Delta P_0 = 1,02 \times 6,80 - 0,8 \times 2,04 = 5,30 \text{ MN}$$

$$P_2 = 0,98P_0 - 1,20\Delta P_0 = 0,98 \times 6,80 - 1,20 \times 2,04 = 4,21 \text{ MN}$$

On prend les caractéristiques géométriques de la poutre seule :

$$B = 0,5108 \text{ m}^2$$

$$V' = 0,842 \text{ m}$$

$$V = 0,658 \text{ m}$$

$$I_G = 0,138034 \text{ m}^4$$

$$\rho = 48,8\%$$

Donc il faut vérifier que : Fibre supérieure : $\bar{\sigma}_{st} = -1,5f_{t28} = -4,05 \text{ Mpa}$

Fibre inférieure : $\sigma_{ci} = 0,6f_{c28} = 21 \text{ Mpa}$

$$M_{\min} = M_{pp} = 3,362 \text{ MN.m}$$

$$M_q = 2,867 \text{ MN.m}$$

a) Combinaison quasi-permanente

Quasi-permanente : P+G

Selon le VIPP du guide SETRA la précontrainte de première famille est dimensionner pour reprendre l'effet de précontrainte et l'effet de poids propre, elle est mise en tension sur les poutres seules assez rapidement après le bétonnage des poutres.

Donc : on prend les caractéristiques géométriques de la poutre seule.

$$e_0 = -0,722 \text{ m.}$$

– Les deux équations suivantes doivent être vérifiées :

$$\frac{P}{B} - \frac{P \times e \times V}{I_G} + \frac{M_{\min} \times V}{I_G} \geq \bar{\sigma}_{st} = -4,05 \text{ Mpa}$$

$$\frac{P}{B} + \frac{P \times e \times V'}{I_G} - \frac{M_{\min} \times V'}{I_G} \leq \sigma_{ci} = 21 \text{ Mpa}$$

| P₁ | | | |
|------------------------|---|---|-----------------|
| P₁/B | P₁ × e × V / I_G | M_{min} × V / I_G | Résultat |
| 10,37 | 18,07 | 16,02 | 8,32 Mpa |
| P₁/B | P₁ × e × V' / I_G | M_{min} × V' / I_G | Résultat |
| 10,37 | 23,34 | 20,51 | 13,2 Mpa |

Tableau 3.2. Combinaison quasi-permanente de P1

Etude de la précontrainte

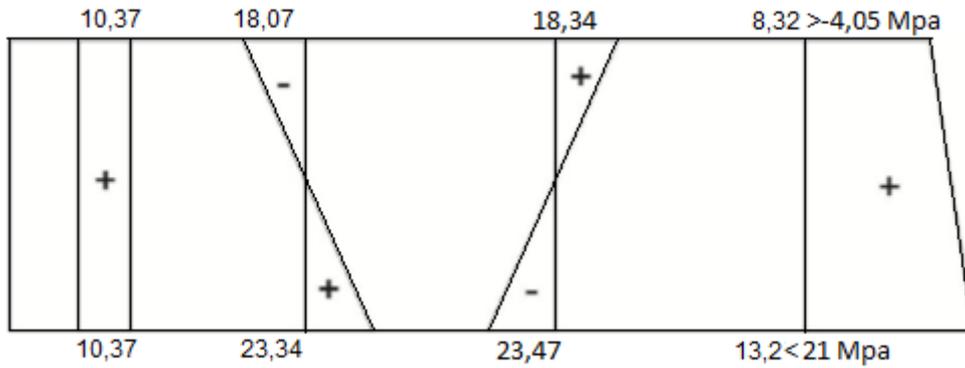


Figure 3.1. Diagramme de la combinaison quasi-permanente de P1

– Sous P_1 :

$8,32 > -4,05 \text{ Mpa} \Rightarrow$ condition vérifiée.

$13,2 < 21 \text{ Mpa} \Rightarrow$ condition vérifiée.

| P_2 | | | |
|---------|------------------------------|--------------------------|----------|
| P_2/B | $P_2 \times e \times V/I_G$ | $M_{\min} \times V/I_G$ | Résultat |
| 8,24 | 14,35 | 16,02 | 9,91 Mpa |
| P_2/B | $P_2 \times e \times V'/I_G$ | $M_{\min} \times V'/I_G$ | Résultat |
| 8,24 | 18,54 | 20,51 | 6,27 Mpa |

Tableau 3.3. Combinaison quasi- permanente de P2

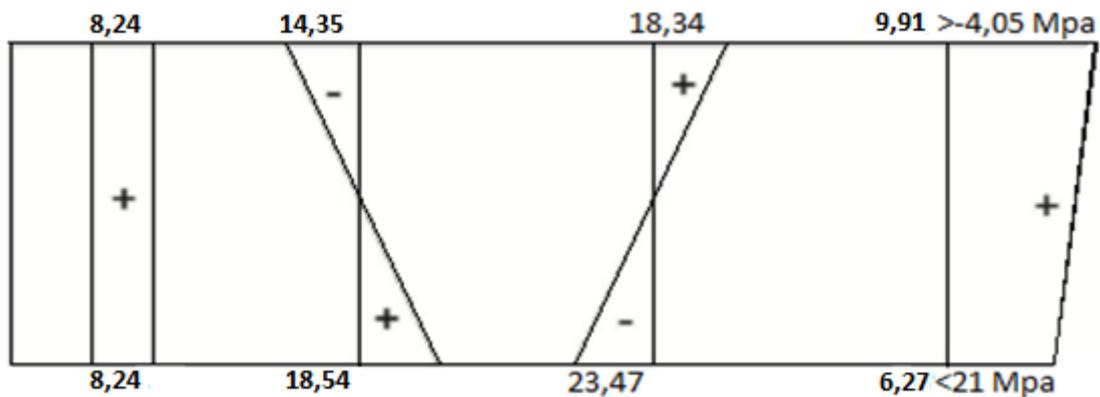


Figure 3.2. Diagramme de la combinaison quasi-permanente de P2

– Sous P_2 :

$9,91 > -4,05 \text{ Mpa} \Rightarrow$ condition vérifiée

$6,27 < 21 \text{ Mpa} \Rightarrow$ condition vérifiée

b) Combinaison fréquente

Selon le VIPP du guide SETRA la précontrainte de deuxième famille est dimensionner pour reprendre les actions supplémentaires (superstructure et actions variables), elle est mise en tension lorsque le béton du hourdis a acquis une certaine résistance.

Fréquente : $P+G+0,72Q$

Donc : on prend les caractéristiques géométriques de la poutre+hourdis.

$e_0 = -1,031$ m

– Les deux équations suivantes doivent être vérifiées :

$$\frac{P}{B} - \frac{P \times e \times V}{I_G} + \frac{M_{min} \times V}{I_G} + \frac{0,72 \times M_Q \times V}{I_G} \geq \bar{\sigma}_{st} = -4,05 \text{ Mpa}$$

$$\frac{P}{B} + \frac{P \times e \times V'}{I_G} - \frac{M_{min} \times V'}{I_G} - \frac{0,72 \times M_Q \times V'}{I_G} \leq \sigma_{ci} = 21 \text{ Mpa}$$

| P₁ | | | | |
|------------------------|---|---|--|-----------------|
| P₁/B | P₁×e×V/I_G | M_{min}×V/I_G | 0,72×M_q×V/I_G | Résultat |
| 5,74 | 10,80 | 6,65 | 4,08 | 5,67 Mpa |
| P₁/B | P₁×e×V'/I_G | M_{min}×V'/I_G | 0,72×M_Q×V'/I_G | Résultat |
| 5,74 | 23,19 | 14,27 | 8,76 | 5,9 Mpa |

Tableau 3.4. Combinaison fréquente de P1

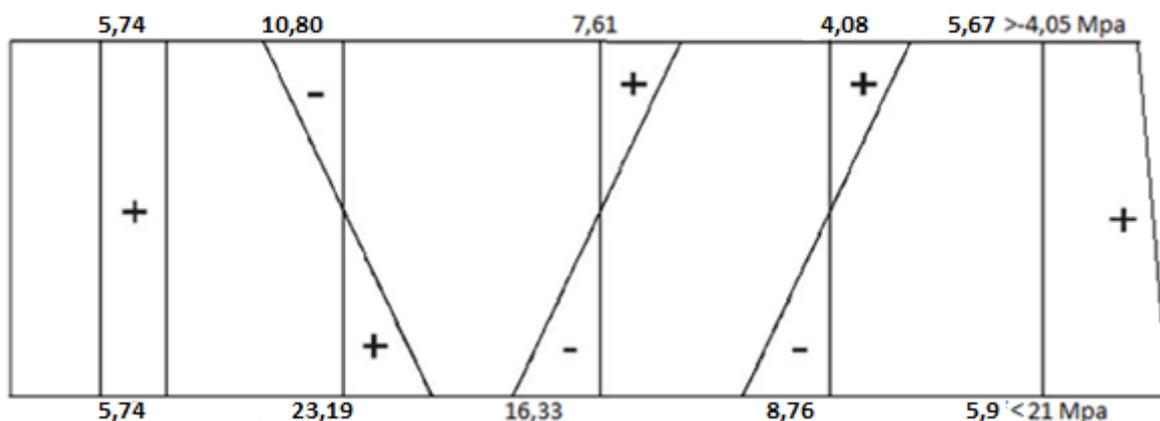


Figure 3.3. Digramme de la combinaison fréquente de P1

– Sous P₁ :

$5,67 > -4,05 \text{ Mpa} \Rightarrow$ condition vérifiée

$5,9 < 21 \text{ Mpa} \Rightarrow$ condition vérifiée

Etude de la précontrainte

| P₂ | | | | |
|------------------------|---|---|--|-----------------|
| P₂/B | P₂×e×V/I_G | M_{min}×V/I_G | 0,72×M_Q×V/I_G | Résultat |
| 4,55 | 8,58 | 6,65 | 4,08 | 6,7 Mpa |
| P₂/B | P₂×e×V'/I_G | M_{min}×V'/I_G | 0,72×M_Q×V'/I_G | Résultat |
| 4,55 | 18,42 | 14,27 | 8,76 | 0,06 Mpa |

Tableau 3.5. Combinaison fréquente de P2

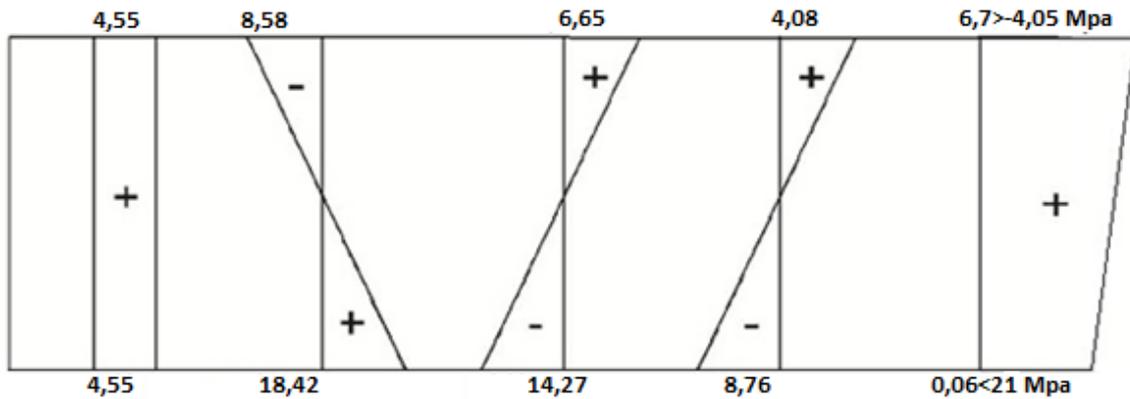


Figure 3.4. Digramme de la combinaison fréquente de P2

– Sous P₂ :

6,7 > 4,05 Mpa ⇒ condition vérifiée

0,06 < 21 Mpa ⇒ condition vérifiée

c) Combinaison rare

Rare : P+G+1,2Q

– Les deux équations suivantes doivent être vérifiées :

$$\frac{P}{B} - \frac{P \times e \times V}{I_G} + \frac{M_{min} \times V}{I_G} + \frac{1,2 \times M_Q \times V}{I_G} \geq \bar{\sigma}_{st} = -4,05 \text{ Mpa}$$

$$\frac{P}{B} + \frac{P \times e \times V'}{I_G} - \frac{M_{min} \times V'}{I_G} - \frac{1,2 \times M_Q \times V'}{I_G} \leq \sigma_{ci} = 21 \text{ Mpa}$$

| P₁ | | | | |
|------------------------|---|---|---|-----------------|
| P₁/B | P₁×e×V/I_G | M_{min}×V/I_G | 1,2×M_Q×V/I_G | Résultat |
| 5,74 | 10,80 | 6,65 | 6,80 | 8,39 Mpa |
| P₁/B | P₁×e×V'/I_G | M_{min}×V'/I_G | 1,2×M_Q×V'/I_G | Résultat |
| 5,74 | 23,19 | 14,27 | 14,60 | 0,06 Mpa |

Tableau 3.6. Combinaison rare de P1

Etude de la précontrainte

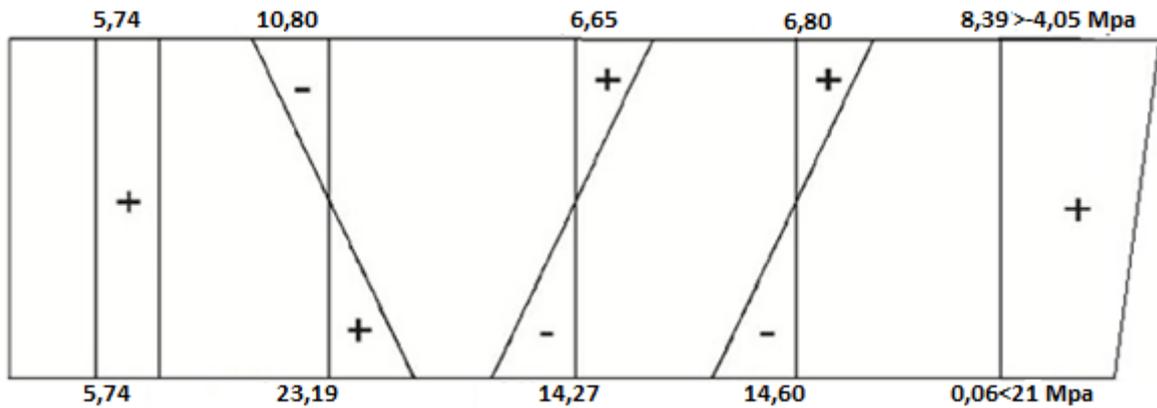


Figure 3.5. Diagramme de la combinaison rare de P1

– Sous P_1 :

$8,39 > -4,05$ Mpa \Rightarrow condition vérifiée

$0,06 < 21$ Mpa \Rightarrow condition vérifiée

| P_2 | | | | |
|---------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------|
| P_2/B | $P_2 \times e \times V/I_G$ | $M_{\min} \times V/I_G$ | $1,2 \times M_Q \times V/I_G$ | Résultat |
| 4,55 | 8,58 | 6,65 | 6,80 | 9,42 Mpa |
| P_2/B | $P_2 \times e \times V'/I_G$ | $M_{\min} \times V'/I_G$ | $1,2 \times M_Q \times V'/I_G$ | Résultat |
| 4,55 | 18,42 | 14,27 | 12 | -3,3 Mpa |

Tableau 3.7. Combinaison rare de P2

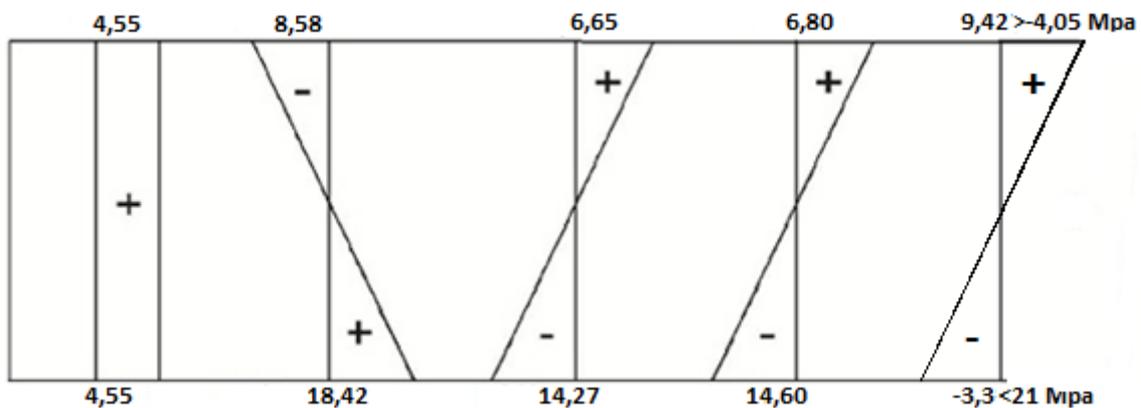


Figure 3.6. Diagramme de la combinaison rare de P2

– Sous P_2 :

$9,42 > -4,05$ Mpa \Rightarrow condition vérifiée

$-3,3 < 21$ Mpa \Rightarrow condition vérifiée

8. DISPOSITION DES CABLES

On opte pour la théorie simplifiée qui exige deux conditions :

- la précontrainte $P(x)$ est admise constante sur le tronçon considéré $P(x) = P_0 =$ constante.
- L'inclinaison $\alpha(x)$ des câbles de précontraint par rapport à l'axe x (parallèle à l'axe Longitudinal) est faible.

Le tracé d'un câble de précontraint non rectiligne peut être assimilé à une parabole du deuxième degré dont l'équation et ses dérivées sont :

$$Y = a x^2 + b x + c.$$

$$Y' = 2a x + b.$$

$$Y'' = 2a.$$

a) Tracé des câbles sortants de l'about

On fixe $B=0,45$ m.

$$Y_g = (A_1 + 0,45 + A_1) / 2 = 0,915 \text{ m.}$$

$$A_1 = 0,69 \text{ m.}$$

$$A_2 = 1,5 - (0,45 + 0,69) = 0,36 \text{ m}$$

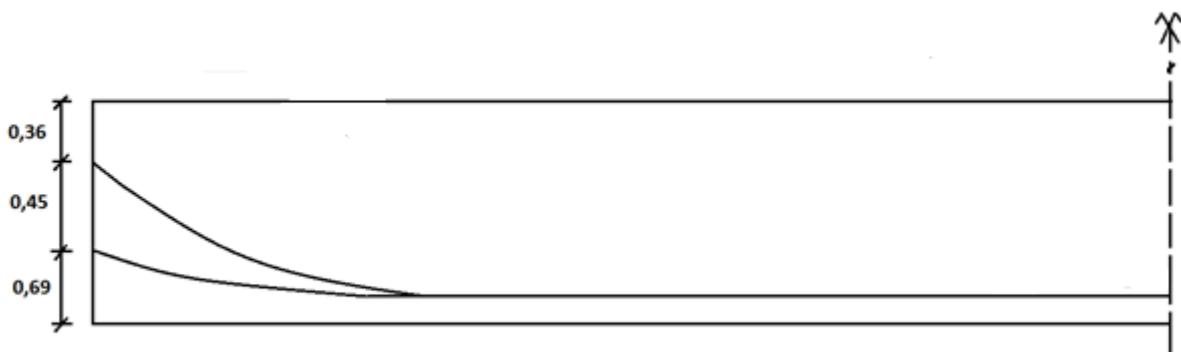
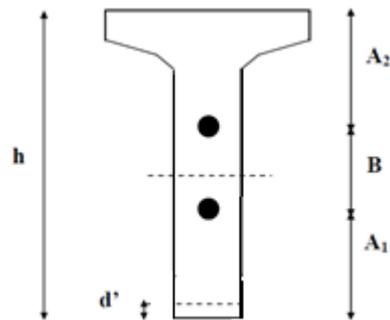


Figure 3.7. Câbles de l'about

b) Calcul des angles sortant de l'about

$$\text{tang } \alpha = \frac{2(L_p/2 + l_1 - l_2)}{H \left[\left(\frac{L_p/2 + l_1 - l_2}{H} \right)^2 - 1 \right]}$$

Pour le calcul des α_i on fixe l_2 du deuxième câble au départ et on ajoute une raison de 1,5 m.

Donc on a : $l_{2,2} = 10$ m ; $l_{2,1} = 11,5$ m ; $l_1 = 1$ m.

Etude de la précontrainte

$$\tan \alpha_1 = \frac{2 \times (16,8 + 1 - 11,5)}{0,57 \times \left[\left(\frac{16,8 + 1 - 11,5}{0,57} \right)^2 - 1 \right]} = 0,182 \quad \Rightarrow \quad \alpha_1 = 10,33^\circ$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{2(16,8 + 1 - 10)}{1,02 \times \left[\left(\frac{16,8 + 1 - 10}{1,02} \right)^2 - 1 \right]} = 0,266 \quad \Rightarrow \quad \alpha_2 = 14,90^\circ$$

Détermination des équations et des distances de chaque câble :

$$b_i = \frac{2 \times (e_i - d_i - 100 \tan \alpha_i)}{\tan \alpha_i} \quad ; \quad a_i = \frac{\tan \alpha_i}{2 \times b_i}$$

$$b_1 = \frac{2}{0,182} \times (69 - 12 - 100 \times 0,182) = 426,37 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad a_1 = 2,13 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$b_2 = \frac{2}{0,266} (114 - 12 - 100 \times 0,266) = 566,91 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad a_2 = 2,34 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

c) Trace du câble émergeant sur la fibre supérieure de la poutre

La zone de relevage entraîne une diminution de l'intensité de la précontrainte au même temps qu'une diminution de la valeur absolue de l'excentricité 'e' (par relevage du C.D.G de l'ensemble des câbles) d'où une diminution progressive du moment de précontrainte pour s'annuler sur les appuis.

$$\text{Zone de relevage est : } \frac{1}{4} \leq l_0 \leq \frac{1}{3} \quad \Rightarrow \quad 8,35 \leq l_0 \leq 11,13 \quad \Rightarrow \quad l_0 = 8,35 \text{ m}$$

A l'extrados $\alpha = 24,15^\circ$ telle que $\tan \alpha = 0,45$

Le câble présente une partie parabolique EG et une partie rectiligne GC pour que l'effort de précontrainte créée à l'encrage se transmette convenablement au câble.

Le câble sera placé à 3,5m de l'appui et l'équation de la parabole du câble est : $y = ax^2$

$$EG = ab^2 \Rightarrow a = \frac{EG}{b^2}$$

$$\tan \alpha = \frac{dy}{dx}(b) = 2 a \times b \quad \Rightarrow \quad b = 2 \times \frac{EG}{\tan \alpha} = GC$$

$$EG = 150 - 16 - 41 = 93 \text{ cm}$$

$$b = 2 \times \frac{93}{0,45} = 413,33 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad a = \frac{93}{413,33^2} = 5,44 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

| N° Câble | e (cm) | d (cm) | α (deg) | $a \times 10^{-4}$ | b(cm) | $y = ax^2$ |
|----------|--------|--------|----------------|--------------------|--------|---------------------------|
| 1 | 69 | 12 | 10,33 | 2,13 | 426,37 | $2,13 \times 10^{-4} x^2$ |
| 2 | 114 | 12 | 14,90 | 2,34 | 566,91 | $2,34 \times 10^{-4} x^2$ |
| 3 | 150 | 16 | 24,15 | 5,44 | 413,33 | $5,44 \times 10^{-4} x^2$ |

Tableau 3.8. Tableau récapitulatif du tracé des câbles

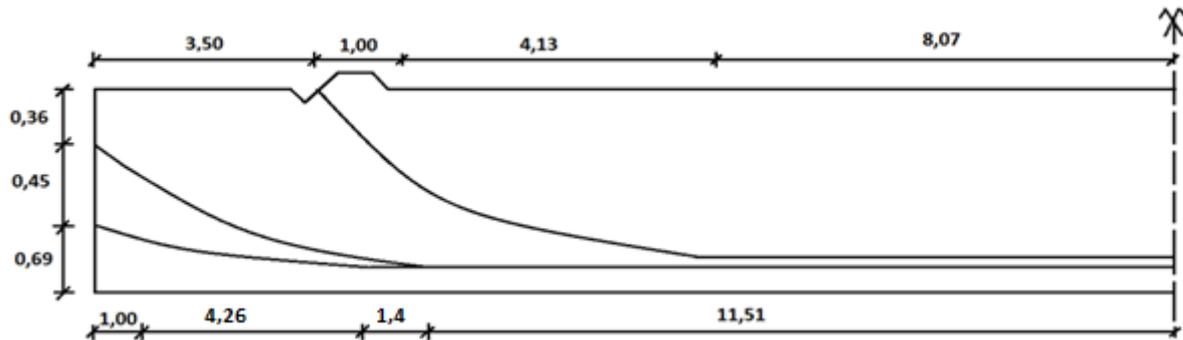


Figure 3.8. Tracé des câbles

9. CALCUL DES PERTES DE PRECONTRAINTES

D'une façon générale, on appelle perte de précontrainte toute différence entre la force exercée par le vérin et la force dans l'armature à un moment donné. on doit alors tenir compte des pertes et des chutes de tension qui vont se produire entre l'instant de la mise en tension et la période de service de l'ouvrage, ce qui permet de connaître la tension nécessaire à réaliser pendant la mise en tension. On distingue deux catégories de pertes de tension :

- pertes instantanées
- pertes différés

9.1. pertes instantanées

Se produisent au moment de la mise en tension, elles sont due au raccourcissement élastique du béton, frottement câble/béton et le glissement (reculé d'ancrage).

9.1.1. Pertes par frottements

Elles sont dues au frottement du câble de précontrainte avec la gaine lors de la mise en tension.

Sa formule est donnée par :

$$\Delta\sigma_f(x) = \sigma_{p0}(1 - e^{-(f\alpha + \varphi L)})$$

Avec :

L : est la distance de la section considérée à celle des sorties des organes de mise en tension

e : la base des logarithmes népériens

α : l'angle de relevage du câble en radians

σ_{p0} : contrainte de tension à l'origine $\Rightarrow \sigma_{p0} = 144000 \text{ t/m}^2$

f : coefficient de frottement fils sur gaine $\Rightarrow f = 0,16$

φ : coefficient de frottement en ligne droite $\Rightarrow \varphi = 0,002\text{m}^{-1}$

Etude de la précontrainte

– Pour $x=0,50L$

| Câbles | α (deg) | α (rad) | L | $f \alpha + \phi L$ | $\Delta\sigma_f$ (MPa) | Valeur moyenne |
|--------|----------------|----------------|---------|---------------------|------------------------|----------------|
| 1 | 10,40 | 0,1815 | 16,7065 | 0,0624 | 87,109 | 95,245 |
| 2 | 14,89 | 0,2598 | 16,4703 | 0,0745 | 103,381 | |
| 3 | 24,15 | 0,4214 | 10,795 | 0,0890 | 122,622 | 122,622 |

Tableau 3.9. Les valeurs des pertes par frottements à $x=0,50L$

– Pour $x=0,25L$

| Câbles | α (deg) | α (rad) | L | $f \alpha + \phi L$ | $\Delta\sigma_f$ (MPa) | Valeur moyenne |
|--------|----------------|----------------|--------|---------------------|------------------------|----------------|
| 1 | 10,40 | 0,1815 | 8,3532 | 0,0457 | 64,326 | 72,735 |
| 2 | 14,89 | 0,2598 | 8,2351 | 0,058 | 81,144 | |
| 3 | 24,15 | 0,4214 | 5,3975 | 0,0782 | 108,317 | 108,317 |

Tableau 3.10. Les valeurs des pertes par frottements à $x=0,25L$

9.1.2. Pertes par recule d'ancrage

Cette perte de tension résulte du glissement de l'armature par rapport à son ancrage, ou de la déformation de l'ancrage.

Si : $d \leq L/2$ il faut tirer le câble par les deux extrémités.

Si : $d > L/2$ il faut tirer le câble par une seule extrémité.

$$d = \sqrt{\frac{g \cdot E_p}{\sigma_{p0} (f \frac{\alpha}{L} + \phi)}}$$

g : intensité de recule d'encrage 6 mm

E_p : module d'élasticité de l'acier de précontrainte = $1,90 \times 10^5$ Mpa

| Câbles | α (rad) | L(m) | $(f \frac{\alpha}{L} + \phi)$ | D |
|--------|----------------|--------|-------------------------------|---------|
| 1 | 0,1815 | 33,413 | 0,0028 | 16,8148 |
| 2 | 0,2598 | 33,481 | 0,0032 | 15,7288 |
| 3 | 0,4214 | 21,59 | 0,0051 | 12,4590 |

Tableau 3.11. Les valeurs de « d »

$d < L/2 \Rightarrow$ on tire les câbles par les deux extrémités

Les pertes par recul d'ancrage sont données par la formule suivante :

$$\Delta\sigma_{rec} = 2\sigma_{p0} \left(\frac{f\alpha}{L} + \phi \right) \cdot d$$

Pour le calcul des pertes aux différentes sections nous utilisons le théorème de «Thalès » appliqué au diagramme des tensions :

$$\Delta\sigma_{rec}(0,25L) = \Delta\sigma_{rec}(0,00L) (1 - 0,25L/d)$$

Etude de la précontrainte

$$\Delta\sigma_{rec}(0,50L)=\Delta\sigma_{rec}(0,00L) (1-0,5L/d)$$

| Câbles | d(m) | $\Delta\sigma_{rec}(0,00L)$ | $\Delta\sigma_{rec}(x=3,5m)$ | $\Delta\sigma_{rec}(0,25L)$ | $\Delta\sigma_{rec}(0,50L)$ |
|--------|---------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 16,8148 | 135,594 | 105,242 | 68,23 | 0,00 |
| 2 | 15,7288 | 144,956 | 113,853 | 67,812 | 0,00 |
| 3 | 12,4590 | 0,00 | 172,78 | 97,928 | 0,00 |

Tableau 3.12. Les pertes par recule d'ancrage

9.1.3. Pertes par raccourcissement instantané du béton

Ces pertes sont dues à la non simultanéité de mise en tension des n câbles.

La perte moyenne par câble est :

$$\Delta\sigma_{rac} = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_b}{E_i} E_p$$

Avec :

σ_b : contrainte parabole du béton

E_p : module d'élasticité de l'acier de précontrainte = $1,9 \times 10^5$ Mpa

E_i : Module de déformation longitudinale instantanée du béton = $11000 \sqrt{f_{c28}} = 3,59 \times 10^4$ Mpa

– pertes par raccourcissement instantané du béton pour les câbles d'about

$$\sigma_b = \frac{P}{B} + \frac{P \times e^2}{I} + \frac{M_G \times e}{I}$$

Avec :

$$P = A_p (\sigma_{p0} - \Delta\sigma_{fr} - \Delta\sigma_{rec})$$

| Désignation | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|--------------------------------------|------------|-------------|-------------|
| P(Mpa) | 2,16 | 2,17 | 2,243 |
| e(m) | 0,00 | -0,6572 | -0,722 |
| M _G (MN) | 0 | 1,462 | 1,9504 |
| I(m ⁴) | 0,22322221 | 0,138034732 | 0,138034732 |
| B _{nette} (m ²) | 0,773 | 0,4953 | 0,4953 |
| σ_b (Mpa) | 2,794 | 4,21 | 2,79 |
| $\Delta\sigma_{rac}$ (Mpa) | 7,393 | 11,14 | 7,383 |

Tableau 3.13. Les pertes par raccourcissement instantané pour l'about

– pertes par raccourcissement instantané du béton pour le câble d'extrados

$$\sigma_b = \frac{P_1}{B_p} + \frac{P_1 e_1^2}{I_p} + M_p \frac{e_1}{I_p} + \frac{P_2}{B_t} + \frac{P_2 e_2^2}{I_t} + \frac{M_d e_2}{I_t}$$

Avec :

$$P_1 = 1668 (\sigma_{p0} - \Delta\sigma_{fr} - \Delta\sigma_{rec} - \Delta\sigma_{rac})$$

$$P_2 = 1668 (\sigma_{p0} - \Delta\sigma_{fr} - \Delta\sigma_{rec})$$

Etude de la précontrainte

B_p : section de la poutre seule

B_t : section de la poutre + hourdis

I_t : inertie de la poutre +hourdis

M_p : moment du au poids propre de la poutre seul

M_d : moment de la dalle

| Désignation | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|-------------------------------------|---------|-------------|-------------|
| P1(Mpa) | / | 2,14 | 2,23 |
| P2(Mpa) | / | 2,058 | 2,197 |
| e₁(m) | / | -0,6572 | -0,722 |
| e₂(m) | / | -1,0145 | -1,0310 |
| M_p(MN) | / | 1,462 | 1,9504 |
| M_d(MN) | / | 1,05 | 1,39 |
| I_p(m⁴) | / | 0,138034732 | 0,138034732 |
| I_t(m⁴) | / | 0,280576373 | 0,280576373 |
| B_p(m²) | / | 0,4953 | 0,4953 |
| B_t(m²) | / | 0,9132 | 0,9132 |
| σ_b(Mpa) | / | 10,062 | 8,34 |
| Δσ_{rac}(Mpa) | / | 26,626 | 22,069 |

Tableau 3.14. Les pertes par raccourcissement instantané pour l'extrados

9.1.4. pertes instantanées totales

$$\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_{\text{frot}} + \Delta\sigma_{\text{rec}} + \Delta\sigma_{\text{rac}}$$

– câbles de l'about

| X(m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Δσ_{frot} (MPa) | 0,00 | 72,735 | 95,245 |
| Δσ_{rec} (MPa) | 140,27 | 68,021 | 0,00 |
| Δσ_{rac} (MPa) | 7,393 | 11,14 | 7,383 |
| Pertes totales(MPa) | 147,663 | 151,896 | 102,628 |

Tableau 3.15. Les pertes instantanées totales des câbles de l'about

– câble de l'extrados

| X(m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Δσ_{frot} (MPa) | 0,00 | 108,317 | 122,622 |
| Δσ_{rec} (MPa) | 0,00 | 97,928 | 0,00 |
| Δσ_{rac} (MPa) | 0,00 | 26,626 | 22,069 |
| Pertes totales(MPa) | 0,00 | 232,871 | 144,691 |

Tableau 3.16. Les pertes instantanées totales des câbles de l'extrados

9.2. pertes différées

Elles résultant des déformations ou des contraintes appliquées aux matériaux constitutifs, elles se produisent pendant un certain temps de la vie de l'ouvrage.

Elles résultant des déformations ou des contraintes appliquées aux matériaux constitutifs, elles se produisent pendant un certain temps de la vie de l'ouvrage.

9.2.1. Pertes dues au retrait du béton

Le retrait est un phénomène de raccourcissement du béton dans le temps du à une évaporation de l'eau excédentaire contenue dans le béton. Les câbles de précontrainte solidaires du béton subissent le même raccourcissement.

L'expression de cette perte est prise égale à :

$$\Delta\sigma_r = \varepsilon_r \times E_p$$

Avec :

$$\varepsilon_r = 3 \times 10^{-4} \text{ (région sèche)}$$

$$E_p = 1,9 \times 10^5 \text{ Mpa}$$

De 3 à 7 jours il y a une dissipation de 15% du retrait du béton ; à 60 jours il y a une dissipation de 50% du retrait de béton ; à l'infini on a une dissipation de 100% du retrait du béton.

$$\Delta\sigma_r = 57 \times (1-0,15)$$

$$\Delta\sigma_r = 57 \times (1-0,50)$$

| | |
|---|-------|
| $\Delta\sigma_r$ à l'about (Mpa) | 48,45 |
| $\Delta\sigma_r$ à l'extrados (Mpa) | 28,5 |

Tableau 3.17. Les pertes dues au retrait du béton

9.2.2. Pertes dues au fluage du béton

Le fluage de béton est la déformation qui se produit sous l'effet d'une charge fixe appliquée indéfiniment, elle entraîne une perte de tension dans les câbles de précontrainte donnée par la formule suivante:

$$\Delta\sigma_{fl} = 2 \times \frac{\sigma_b}{E_i} E_p$$

A l'about: $\Delta\sigma_{fl} = 2 \times \frac{1,9 \cdot 10^5}{11000 \sqrt[3]{35}} \times \sigma_b \times (1-0,15) = 8,98 \sigma_b$

A l'extrados: $\Delta\sigma_{fl} = 2 \times \frac{1,9 \cdot 10^5}{11000 \sqrt[3]{35}} \times \sigma_b \times (1-0,5) = 5,28 \sigma_b$

| X(m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| A l'about | 25,09 | 37,805 | 25,054 |
| A l'extrados | / | 53,127 | 44,035 |

Tableau 3.18. Les pertes dues au fluage du béton

9.2.3. pertes dues à la relaxation des aciers

La relaxation de l'acier est un relâchement de tension à longueur constante. L'évaluation de la relaxation finale d'une armature tendue à sa tension initiale est donnée par la relation suivante :

$$\Delta\sigma_{relax}(x) = \frac{6}{100} \times \rho \cdot 1000 \times (\mu - \mu_0) \times \sigma_{pi}(x)$$

Etude de la précontrainte

Avec :

$\rho_{1000}=2,5$ (Très Basse Relaxation)

$\mu_0 = 0.43$ Pour les armatures de très basse relaxation (classe II)

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}}$$

σ_{pi} : tension initiale nette

f_{prg} : 1860 Mpa

– Câbles de l'about

| X(m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|---|----------|----------|----------|
| σ_{p0} | 1440 | 1440 | 1440 |
| $\Delta\sigma_i$ | 147,663 | 151,896 | 102,628 |
| $\sigma_{pi}(x)=\sigma_{p0}-\Delta\sigma_i$ | 1292,337 | 1288,104 | 1337,372 |
| μ | 0,69 | 0,692 | 0,719 |
| $\Delta\sigma_{relaxation}$ (Mpa) | 50,11 | 50,622 | 57,975 |

Tableau 3.19. Les pertes dues à la relaxation des aciers pour les câbles de l'about

– Câble de l'extrados

| X(m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|---|---------|---------|---------|
| σ_{p0} | 0,00 | 1440 | 1440 |
| $\Delta\sigma_i$ | 0,00 | 232,871 | 144,691 |
| $\sigma_{pi}(x)=\sigma_{p0}-\Delta\sigma_i$ | 0,00 | 1207,13 | 1295,3 |
| μ | 0,00 | 0,649 | 0,696 |
| $\Delta\sigma_{relaxation}$ (Mpa) | 0,00 | 39,65 | 51,68 |

Tableau 3.20. Les pertes dues à la relaxation des aciers pour les câbles de l'extrados

9.2.4. Pertes de tensions différées totales

La perte différée finale est prise égale à :

$$\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_{retrait} + \Delta\sigma_{fluage} + \frac{5}{6} \Delta\sigma_{relaxation}$$

– Câbles de l'about

| X(m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| $\Delta\sigma_{retrait}$ (MPa) | 48,45 | 48,45 | 48,45 |
| $\Delta\sigma_{fluage}$ (MPa) | 25,09 | 37,383 | 24,677 |
| $\Delta\sigma_{relaxation}$ (MPa) | 50,11 | 50,622 | 57,975 |
| $\Delta\sigma_d$ (MPa) | 115,298 | 128,018 | 121,439 |

Tableau 3.21. Les pertes de tensions différées totales des câbles de l'about

– Câble de l'extrados

| X(m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| $\Delta\sigma_{retrait}$ (MPa) | 0,00 | 28,5 | 28,5 |
| $\Delta\sigma_{fluage}$ (MPa) | 0,00 | 52,879 | 43,771 |
| $\Delta\sigma_{relaxation}$ (MPa) | 0,00 | 39,65 | 51,68 |
| $\Delta\sigma_d$ (MPa) | 0,00 | 113,001 | 114,73 |

Tableau 3.22. Les pertes de tensions différées totales des câbles de l'extrados

9.3. Calcul du pourcentage des pertes totales

$\Delta\sigma_{total} = 2 \times (\Delta\sigma_{instantanées, about} + \Delta\sigma_{différées, about}) + 1 \times (\Delta\sigma_{instantanées, extrados} + \Delta\sigma_{différées, extrados})$

$$\text{Pertes (\%)} = \frac{\Delta\sigma_{total}}{3 \times \sigma_{p0}}$$

| X(m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|------------------------------|---------|---------|---------|
| $\Delta\sigma_{total}$ (MPa) | 525,922 | 905,7 | 737,555 |
| Pertes (%) | 12,17 | 20,96 | 17,07 |

Tableau 3.23. Pourcentage réel des pertes

L'estimation des pertes à 25% est vérifié après le calcul, donc le nombre de câbles est bel et bien vérifié et égale à 3 câbles de 12T15 chacun.

10. Vérification à l'ELS des contraintes de la poutre la plus sollicité

La vérification est effectuée à mi-travée, point critique en flexion. On vérifiera que les contraintes restent dans le domaine des contraintes admissibles suivant deux phases :

– Phase 1 :

A la mise en tension, en considérant la poutre seule avec une précontrainte à 50%.

Le B.P.E.L donne : $P_1 = 1,02P_0 - 0,8\sigma_{pi}$; dans cette phase, on considère que les pertes instantanées.

| X (m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|--------------------------|------------|-------------|-------------|
| B (m²) | 0,773 | 0,4953 | 0,4953 |
| I (m⁴) | 0,22322221 | 0,138034732 | 0,138034732 |
| V (m) | 0,6611 | 0,658 | 0,658 |
| V'(m) | 0,8389 | 0,842 | 0,842 |
| e₁ (m) | 0,00 | -0,6572 | -0,722 |

Tableau 3.24. Caractéristiques géométriques de la poutre à la mise en tension

Les deux équations suivantes doivent être vérifiées :

$$\frac{P_1}{B} - \frac{P_1 \times e \times V}{I_G} + \frac{M_{min} \times V}{I_G} = \sigma_s \geq \bar{\sigma}_{st} = -4,05 \text{ Mpa}$$

$$\frac{P_1}{B} + \frac{P_1 \times e \times V'}{I_G} - \frac{M_{min} \times V'}{I_G} = \sigma_i \leq \sigma_{ci} = 21 \text{ Mpa}$$

Etude de la précontrainte

Avec :

$$P1=0,50(1,02 P0-0,8\sigma Pi)$$

$$\sigma Pi = \frac{\Delta\sigma i}{\sigma P0} \times P_0 \Rightarrow P0=6,80 \text{ MN}$$

| X(m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|--|----------------|----------------|----------------|
| $\Delta\sigma i$ (Mpa) | 147,663 | 151,896 | 102,628 |
| σPi (Mpa) | 0,697 | 0,717 | 0,484 |
| P1(MN) | 3,189 | 3,181 | 3,274 |
| M_{min} (MN.m) | 0 | 1,462 | 1,9504 |
| σs (Mpa) | 4,12 | 3,42 | 4,64 |
| σi (Mpa) | 4,12 | 10,25 | 9,13 |

Tableau 3.25. Détermination des contraintes à la mise en tension

Les deux équations sont vérifiées.

– **Phase 2 :**

En service, On utilise les caractéristiques géométriques brutes pour sections composite.

Le B.P.E.L donne $P2 = 0,98P0 - 1,2\sigma P$ et on considère les pertes instantanées et différées.

| X (m) | X=0,00L | X=0,25L | X=0,50L |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
| B (m²) | 1,1855 | 0,9132 | 0,9132 |
| I (m⁴) | 0,39221483 | 0,280576373 | 0,280576373 |
| V (m) | 0,64 | 0,555 | 0,555 |
| V'(m) | 1,1101 | 1,191 | 1,191 |
| e₂ (m) | 0,00 | -1,0145 | -1,0310 |

Tableau 3.26. Caractéristiques géométriques de la poutre en service

Les deux équations suivantes doivent être vérifiées :

$$\frac{P2}{B} - \frac{P2 \times e \times V}{I_G} + \frac{M_{min} \times V}{I_G} = \sigma_s \geq \bar{\sigma}_{st} = -4,05 \text{ Mpa}$$

$$\frac{P2}{B} + \frac{P2 \times e \times V'}{I_G} - \frac{M_{min} \times V'}{I_G} = \sigma_i \leq \sigma_{ci} = 21 \text{ Mpa}$$

Avec :

$$P2=0,98P0-1,2\sigma P$$

$$\sigma P = \frac{\Delta\sigma t}{\sigma P0} \times P_0 \Rightarrow P0=6,80 \text{ MN}$$

| X (m) | 0,00L | 0,25L | 0,50L |
|--|--------------|--------------|--------------|
| $\Delta\sigma t$ (Mpa) | 525,922 | 905,7 | 737,555 |
| σP (Mpa) | 2,48 | 4,27 | 3,48 |
| P2(MN) | 3,688 | 1,54 | 2,488 |
| M_{min} (MN.m) | 0 | 1,462 | 1,9504 |
| σs (Mpa) | 3,11 | 1,487 | 1,50 |
| σi (Mpa) | 3,11 | 2,112 | 5,33 |

Tableau 3.27. Détermination des contraintes en service

Les deux équations sont vérifiées.

11. FERRAILLAGE DE LA POUTRE

11.1. Armatures longitudinales

Les armatures transversales et longitudinales seront utilisées en quantités suffisantes pour tenir compte des sollicitations secondaires.

$$A_s = \frac{B_t}{1000} + \frac{N_{bt} f_{tj}}{f_e \sigma_{bt}}$$

Avec :

B_t : surface du béton tendu (cm^2).

N_{bt} : Effort normal dans la partie du béton tendu = surface de la partie du diagramme des contraintes dans la zone du béton tendu.

f_{tj} : contraintes de traction du béton calculée à partir de f_{cj} .

σ_{bt} : contrainte de traction réelle dans le béton

h_{bt} : correspond au lieu où la contrainte est nulle.

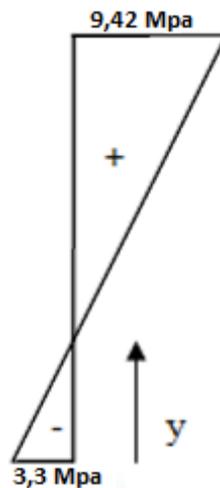


Figure 3.9. Diagramme des contraintes sous P2 (combinaison rare)

$$\sigma_i = 3,3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_s = 9,42 \text{ Mpa}$$

$$3,3(1,5-y) = 9,42y \Rightarrow y = 0,389 \text{ m}$$

$$B_t = 3,3 \times 0,389 \times 0,5 = 0,641 \text{ m}^2$$

$$N_{bt} = \frac{\sigma_{bt} \times B_t}{2} = 1,05 \text{ MN}$$

$$A_s = \frac{0,641}{1000} + \frac{1,05 \times 2,7}{400 \times 3,3} = 27,88 \text{ cm}^2$$

On prend: 9HA20 = 28,27 cm^2

11.2. Armatures de peau

Le but de ces armatures est essentiellement de limiter la fissuration du béton avant l'application de la force de précontrainte sous l'action de phénomènes tels que retrait différentiel.

– Longitudinale

Pour les armatures de peau on prend $3 \text{ cm}^2 / \text{ml}$ de périmètre de section et $A / B > 0,1 \%$.

$$A_{pl} = 3 \times (1,5 + 0,47) \times 2 = 11,82 \text{ cm}^2$$

$$A_{pl}/B = 11,82/5108 = 0,23\%$$

Soit 16HA10 réparties sur le porteur espacé de 20 cm.

– Transversale

$2 \text{ cm}^2 / \text{ml}$ de parement mesuré parallèle à l'axe du CDG et placé sur le pourtour. Le choix se portera ici sur des cadres.

$$S_t = \min(0,8h ; 3b ; 1\text{m}) = \min(1,2 ; 1,41 ; 1) = 1\text{m}.$$

On prendra ici un écartement de 20 cm au droit des appuis pour atteindre 1m au centre.

$$\frac{A_t}{S_t \times b_r} \geq \frac{\gamma_s \times \tau_u}{f_e}$$

Avec :

$$\tau_u = \frac{T_u}{b_0 \times d} = \frac{0,2806}{0,21 \times 1,35} = 0,99 \text{ Mpa}$$

b_r : largeur réduite au sens du BPEL 91

$$b_r = 0,47 - 0,08 = 0,39 \text{ m}$$

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{c28} = 35 \text{ Mpa}$$

$$f_e = 400 \text{ Mpa}$$

$$A_t \geq b_r \times S_t \times \frac{\gamma_s \times \tau_u}{f_e}$$

$$A_t \geq 2,22 \text{ cm}^2$$

On prend des cadres de HA10.

11.3. Armatures supérieures de la table de compression

L'aile de la poutre est sollicitée par les efforts suivants :

– Le poids propre :

$$q_1 = [(11+16)/2 \times 28 + 16 \times 23,5] \times 2,5 \times 1 \times 10^{-4} = 0,1885 \text{ t/ml}$$

– Le béton frais hourdis :

$$q_2 = (51,5 \times 25) \times 2,5 \times 1 \times 10^{-4} = 0,321 \text{ t/ml}$$

- une surcharge de 450Kg/m² provoquée par la présence des ouvriers et du matériel des travaux lors de la construction.

$$q_3 = (1,5 \times 0,45 \times 0,515) = 0,347 \text{ t/ml}$$

$$q_{\text{total}} = q_1 + q_2 + q_3 = 0,1885 + 0,321 + 0,347 = 0,8565 \text{ t/ml}$$

L'aile de la poutre est donc supposée comme une console.

$$M = \frac{qL^2}{2} = \frac{0,8565 \times 0,515^2}{2} = 0,113 \text{ t.m/ml}$$

$$A = \frac{M}{Z \cdot \sigma_a}$$

Avec :

$$Z = \frac{7}{8} h_0 = \frac{7}{8} (1,35) = 1,18 \text{ m}$$

$$\bar{\sigma}_a = \frac{2}{3} \sigma_{\text{en}} = \frac{2}{3} \times 400 = 266,66 \text{ Mpa}$$

$$A = \frac{0,113}{1,18 \times 267} = 0,35 \text{ cm}^2$$

On prend 1HA10 tous les 14cm sur appui et 23 cm en travée.

11.4. Effort tranchant maximum

T_{max} = 1,13 MN (à l'ELU)

$$\tau_v = \frac{T \times S}{b \times I_G}$$

S : moment statique de l'hourdis par rapport au plan de contrainte poutre-hourdis.

$$S = 1,65 \times 0,25 \times 0,125 = 0,052 \text{ m}^3$$

$$I_G : \text{inertie de la poutre seul} = 0,22322221 \text{ m}^4$$

b : largeur de l'hourdis revient à chaque poutre = 1,65 m

$$\tau_v = \frac{1,13 \times 0,052}{1,65 \times 0,22322221}$$

$$\tau_v = 0,159 \text{ Mpa}$$

$$\tau_b = \tau_r + \tau_v = 0,159 + 1,02 = 1,18 \text{ Mpa}$$

1,18 Mpa < 1,5f_{ij} = 4,05 Mpa ⇒ condition vérifiée.

11.5. Effort de cisaillement dalle-poutres

$$g = \tau_b \times b = 1,18 \times 1,65 = 1,947 \text{ MN.m}$$

$$A_t = \frac{g \times t}{\bar{\sigma}_{\text{at}}} = \frac{2,05 \times 0,16}{2/3(400)} = 12,3 \text{ cm}^2$$

On prend 16HA10/ml = 12,56 cm²

$$\sigma_{\text{at}} = \frac{g \times t}{A_t} = \frac{2,05 \times 0,16}{12,56} = 261,15 \text{ MPa}$$

$261,15 < 267 \text{ MPa} \Rightarrow \sigma_{at} < \overline{\sigma_{at}} \Rightarrow \text{condition vérifiée}$

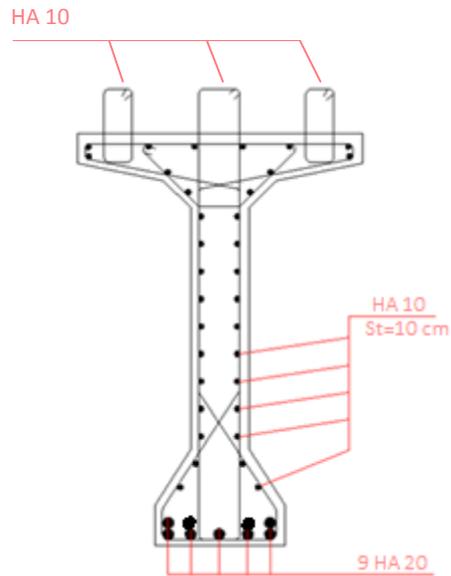


Figure 3.10. ferrailage passif de la poutre

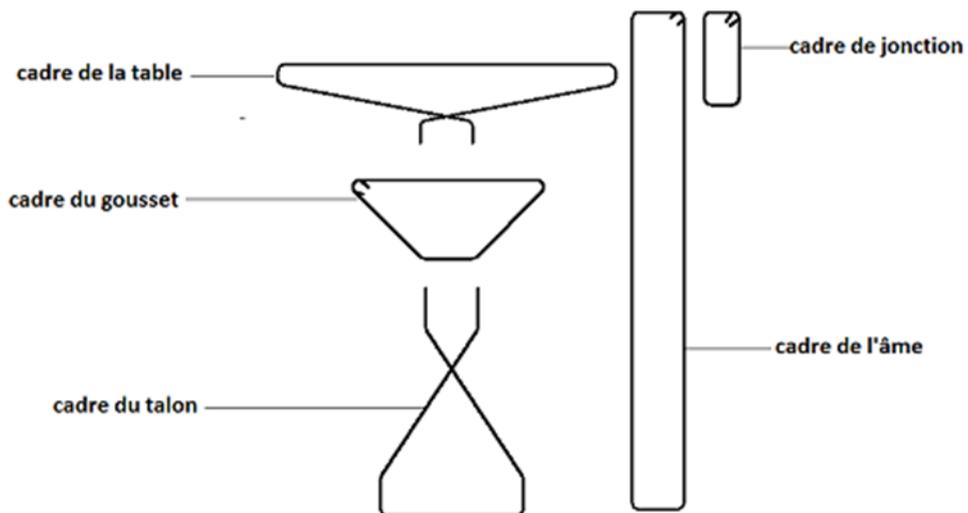


Figure 3.11. Détail du ferrailage transversal passif de la poutre

1. INTRODUCTION

L'hourdis est une dalle en béton armé qui est destinée à recevoir la couche de roulement (revêtement) et les surcharges à transmettre aux poutres. Il assure la répartition transversale des efforts.

2. ÉVALUATION DES SOLLICITATIONS

L'hourdis est constitué d'une dalle en béton armé de 25cm d'épaisseur, recouverte d'une couche de revêtement de 8,5cm ; reposant sur des poutres en béton précontrainte. Les valeurs des moments présentées dans la figure sont obtenues d'après par le SAP2000 v 14.2, et on a pris la valeur maximum.

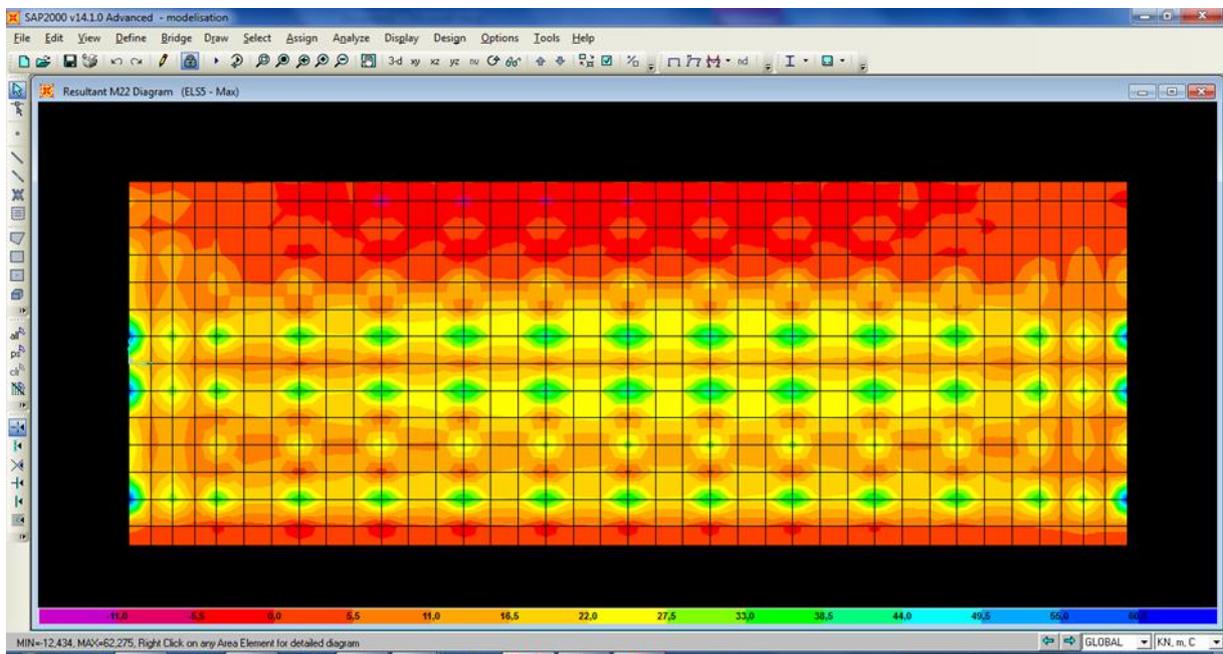


Figure 4.1. Exemple du moment longitudinal maximum

3. ÉTUDE DES MOMENTS FLECHISSANT

Après avoir étudié chaque cas de chargement en flexion, et avoir appliqué toutes les combinaisons, les résultats des moments sont donnés dans le tableau :

Etude de l'hourdis

a) ELU(KN.m)

| | Transversal (M_{1-1}) | | Longitudinal (M_{2-2}) | |
|--------------------|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| | En Appui | En travée | En Appui | En travée |
| A(L) | 20,765 | 50,966 | 18,848 | 14,798 |
| BC centre | 31,054 | 72,927 | 26,373 | 41,070 |
| BC excentre | 39,261 | 68,239 | 38,607 | 27,993 |
| Bt .c | 16,971 | 33,783 | 17,001 | 5,040 |
| Bt .ex | 17,839 | 34,339 | 17,843 | 5,391 |
| Mc120.C | 37,184 | 65,929 | 37,688 | 52,594 |
| Mc120.ex | 56,459 | 65,431 | 82,994 | 45,857 |
| D280.c | 17,751 | 41,951 | 18,178 | 22,154 |
| D280.ex | 26,953 | 41,662 | 28,655 | 15,738 |

Tableau 4.1. Moments fléchissant à l'ELU

b) ELS(KN.m)

| | Transversal (M_{1-1}) | | Longitudinal (M_{2-2}) | |
|--------------------|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| | En Appui | En travée | En Appui | En travée |
| A(L) | 15,426 | 37,968 | 13,987 | 11,133 |
| BC centre | 23,238 | 54,453 | 19,707 | 30,861 |
| BC excentre | 29,298 | 49,298 | 28,808 | 21,063 |
| Bt .c | 12,581 | 25,034 | 12,603 | 3,736 |
| Bt .ex | 13,232 | 25,451 | 13,235 | 3,999 |
| Mc120.C | 27,543 | 48,837 | 27,910 | 38,958 |
| Mc120.ex | 41,822 | 48,467 | 61,477 | 33,968 |
| D280.c | 13,148 | 31,074 | 13,465 | 16,41 |
| D280.ex | 19,965 | 30,861 | 21,226 | 11,657 |

Tableau 4.2. Moments fléchissant à l'ELS

4. ÉTUDE DES EFFORTS TRANCHANTS

| | Efforts tranchants ELU | | Efforts tranchant ELS | |
|-------------|--|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| | Vxx(V ₁₋₃) Longitudinal | Vyy(V ₂₋₃) transversal | Vxx(V ₁₋₃) Longitudinal | Vyy(V ₂₋₃) Transversal |
| A(L) | 40,55 | 26,66 | 30,12 | 19,83 |
| BC centre | 74,02 | 52,87 | 55,40 | 39,53 |
| BC excentre | 70,03 | 55,80 | 52,38 | 14,99 |
| Bt .c | 32,99 | 22,39 | 24,45 | 14,99 |
| Bt .ex | 33,67 | 22,39 | 24,96 | 16,61 |
| Mc120.C | 58,79 | 80,04 | 43,55 | 59,29 |
| Mc120.ex | 67,57 | 51,40 | 50,05 | 38,08 |
| D280.c | 33,45 | 29,71 | 24,78 | 22,01 |
| D280.ex | 42,81 | 25,73 | 31,71 | 19,06 |

Tableau 4.3. Efforts tranchants à l'ELU et l'ELS

5. CALCUL DU FERRAILLAGE

On détermine le ferrailage par un mètre linéaire, pour cela, on prend la largeur b=1m.

$f_{c28} = 35 \text{ Mpa}$; $\gamma_b=1,5$; $\gamma_s = 1,15$.

Aciers à hautes adhérences (H.A) feE400.

Fissuration préjudiciable(2).

a) ELU :

• En travée : sens longitudinal

$M_u = 52,594 \times 10^{-3} \text{ MN}$; $b = 1 \text{ m}$; $h = 0,25 \text{ m}$; $d = 0,9h = 0,225 \text{ m}$

$\mu_r = 0,392$

$$f_{bc} = \frac{0,85 \times f_{c28}}{\gamma_b} = 19,83 \text{ Mpa}$$

$$\mu_u = \frac{M_u}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \frac{52,594 \times 10^{-3}}{1 \times (0,225)^2 \times 19,83} = 0,052 < 0,392 \quad \longrightarrow \text{section simple armature}$$

$$\alpha = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2\mu}) = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,052}) = 0,066$$

$$z = d(1 - 0,4\alpha) = 0,225(1 - 0,4 \times 0,066) = 0,219 \text{ m}$$

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 347,82 \text{ Mpa}$$

$$A_{st} = \frac{M_u}{z \times \sigma_s} = \frac{52,594 \times 10^{-3}}{0,219 \times 347,82} = 6,904 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 6,904 \text{ cm}^2$$

| | Sens longitudinal | Sens transversal |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Mu(MN.m) | $52,594 \times 10^{-3}$ | $72,927 \times 10^{-3}$ |
| μ | 0,052 | 0,072 |
| α | 0,066 | 0,093 |
| Z(m) | 0,219 | 0,216 |
| Ast(cm²) | 6,904 | 9,706 |

Tableau 4.4. Ferrailage de l'hourdis en travée à l'ELU

- **En appui :**

$\mu < \mu_r$ \Rightarrow section simple armature

| | Sens longitudinal | Sens transversal |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Mu(MN.m) | $82,994 \times 10^{-3}$ | $56,459 \times 10^{-3}$ |
| μ | 0,082 | 0,072 |
| α | 0,108 | 0,093 |
| Z(m) | 0,215 | 0,218 |
| Ast(cm²) | 11,098 | 7,42 |

Tableau 4.5. Ferrailage de l'hourdis en appui à l'ELU

b) ELS :

– **En travée : sens longitudinal**

$$M_s = 38,958 \times 10^{-3} \text{ MN}$$

Il faut vérifier ces deux conditions : $-\sigma_{bc} < \bar{\sigma}_{bc}$

$$-\sigma_{st} < \bar{\sigma}_{st}$$

- Détermination de l'axe neutre (x) :

$$\frac{bx^2}{2} + n \times A_{sc}(x - d') - n \times A_{st} \times (d - x) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

$A_{sc} = 0$; n : coefficient d'équivalence = 15

$$(1) \Rightarrow 0,5x^2 - 15 \times 6,904 \times 10^{-4} \times (0,225 - x) = 0$$

$$\Rightarrow \sqrt{\Delta} = 0,068$$

$$\Rightarrow x = 0,058 \text{ m}$$

- Détermination des contraintes :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_s \times x}{I}$$

$$I = \frac{b \times x^3}{3} + n \times A_{st} \times (d - x)^2$$

$$I = \frac{1 \times 0,058^3}{3} + 15 \times 6,904 \times 10^{-4} \times (0,225 - 0,058)^2$$

$$I = 3,538 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Etude de l'hourdis

$$\sigma_{bc} = \frac{38,958 \times 10^{-3} \times 0,058}{3,538 \times 10^{-4}}$$

$$\sigma_{bc} = 6,386 \text{ Mpa}$$

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ Mpa}$$

$\sigma_{bc} < \bar{\sigma}_{bc} \Rightarrow$ condition vérifiée

$$\sigma_{st} = n \times \frac{M_s \times (d-x)}{I}$$

$$\sigma_{st} = 15 \times \frac{38,958 \times 10^{-3} \times (0,225 - 0,058)}{3,538 \times 10^{-4}}$$

$$\sigma_{st} = 275,83 \text{ Mpa}$$

$$\bar{\sigma}_{st} = \min\left(\frac{2}{3} f_e; \max(0,5 f_e, 110 \sqrt{\eta f_{t28}})\right)$$

$$f_{t28} = 0,6 + 0,06 f_{c28} = 2,7$$

$$\bar{\sigma}_{st} = \min(266,66 ; 228,63) = 228,63$$

$\sigma_{st} < \bar{\sigma}_{st} \Rightarrow$ condition non vérifiée

On augmente la section d'armature on adopte $A_{st} = 9,24 \text{ cm}^2$ (6T14)

$$\sigma_{bc} = 5,76 < \bar{\sigma}_{bc} = 21 \text{ Mpa} \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

$$\sigma_{st} = 208,32 < \bar{\sigma}_{st} = 228,63 \text{ Mpa} \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

| | Sens longitudinal | Sens transversal |
|---|-------------------------|-------------------------|
| Ms (MN.m) | $38,958 \times 10^{-3}$ | $54,453 \times 10^{-3}$ |
| σ_{bc} | 5,76 | 7,36 |
| σ_{st} | 208,32 | 225,47 |
| A_{st} (cm²) | 9,24 (6T14) | 12,06 (6T16) |
| Esp (cm) | 17,5 | 15 |

Tableau 4.6. Ferrailage de l'hourdis en travée à l'ELS

– **En appui**

| | Sens longitudinal | Sens transversal |
|---|-------------------------|-------------------------|
| Ms (MN.m) | $61,477 \times 10^{-3}$ | $41,822 \times 10^{-3}$ |
| σ_{bc} | 7,80 | 6,47 |
| σ_{st} | 220,77 | 222,11 |
| A_{st} (cm²) | 14,07 (7T16) | 10,78 (7T14) |
| Esp (cm) | 17,5 | 15 |

Tableau 4.7. Ferrailage de l'hourdis en appui à l'ELS

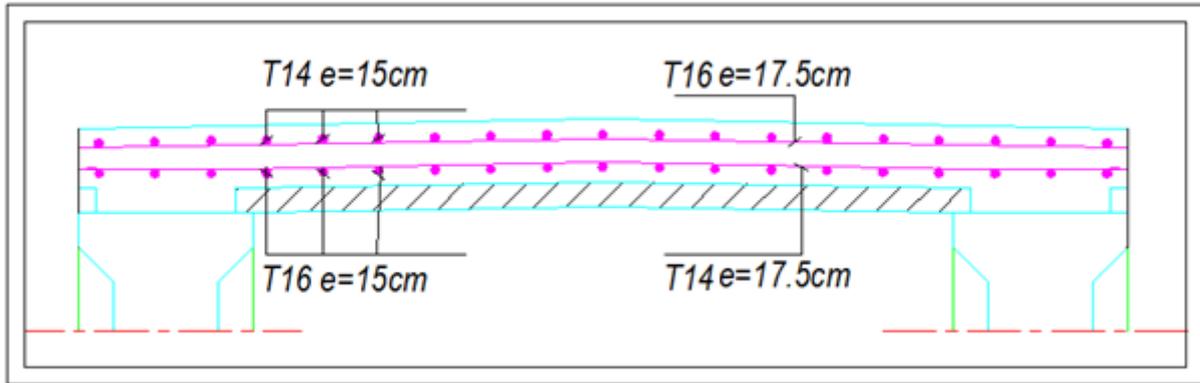


Figure 4.2. Ferrailage de la dalle

c) Condition de non fragilité

$$A_{\min} \geq 0,23 \times b \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e}$$

$$A_{\min} = 0,23 \times 1 \times 0,225 \times \frac{2,7}{400} = 3,49 \text{ cm}^2$$

$6,90 \text{ cm}^2 > 3,49 \text{ cm}^2 \Rightarrow$ condition vérifiée

d) Vérification au poinçonnement

Une force est localisée lorsque les dimensions de son impact petites par rapport aux dimensions de la dalle « Ref 20 » : sous l'action des forces localisées telle que le « Br », il y a lieu de vérifier la résistance de la dalle au poinçonnement(2).

Condition à vérifier :

$$Q_u \leq \frac{0,045 \times U_c \times h \times f_{cj}}{\gamma_b}$$

Avec :

Q_u : charge de calcul à l'état limite ultime

U_c : périmètre du contour au niveau du feuillet moyen

h : épaisseur totale de la dalle

f_{cj} : résistance caractéristique du béton à 28 jours

- La surface d'impact : $U = V = u + h + 2h_r$

Avec : h_r : hauteur du revêtement

$$U = V = 30 + 25 + 2 \times 8,5 = 72 \text{ cm}$$

- $Q_u = 1,5 \times \delta_{br} \times Q$

$$Q_u = 1,5 \times 1,054 \times 10 = 15,81 \text{ t}$$

- $U_c = 2 \times (U + V)$

$$U_c = 2 \times (72 + 72) = 288 \text{ cm}$$

$h=25\text{cm}$; $f_{c28}=35\text{MPa}$;

$$Q_u = 15,81 < \frac{0,045 \times 2,88 \times 0,25 \times 3500}{1,5} = 75,6 \text{ t}$$

Donc, on peut conclure qu'il n'y a pas de risque de poinçonnement

6. RESISTANCE AUX EFFORTS TRANCHANTS

– Effort tranchant transversal

On adopte des armatures droites avec $\alpha=90^\circ(2)$.

$$T_u=80,04 \text{ KN}=80,04 \times 10^{-3} \text{ MN}$$

$$\tau_u = \frac{T_u}{b \times d}$$

$$\tau_u = \frac{80,04 \times 10^{-3}}{1 \times 0,225} = 0,355 \text{ Mpa}$$

$$\tau_{adm} = \min\left(0,15 \frac{f_{c28}}{\gamma_b} ; 4\text{MPa}\right)$$

$$\tau_{adm} = 3,5 \text{ Mpa}$$

$\tau_u < \tau_{adm} \Rightarrow$ condition vérifiée

– Effort tranchant longitudinal

$$T_u=74,02 \text{ KN}=74,02 \times 10^{-3} \text{ Mpa}$$

$$\tau_u = \frac{74,02 \times 10^{-3}}{1 \times 0,225} = 0,328 \text{ Mpa}$$

$$\tau_{adm} = 3,5 \text{ Mpa}$$

$\tau_u < \tau_{adm} \Rightarrow$ condition vérifiée

Les deux conditions sont vérifiées, donc l'hourdis n'a pas besoin d'armatures transversales.

7. ETUDE DE L'ENTRETOISE

Les entretoises sont des éléments transversaux destinés principalement à rigidifier le tablier vis-à-vis des déformations et des déplacements latéraux.

Dans notre cas, nous prévoyons seulement des entretoises d'about qui ont pour rôle :

- D'éviter le déversement des poutres lors du coulage de l'hourdis
- Elles sont indispensables pour soulever le tablier en vue d'un changement des appareils d'appuis

Pour leur calcul, elles seront calculées comme des poutres reposant sur appuis chargée par les réactions des poutres.

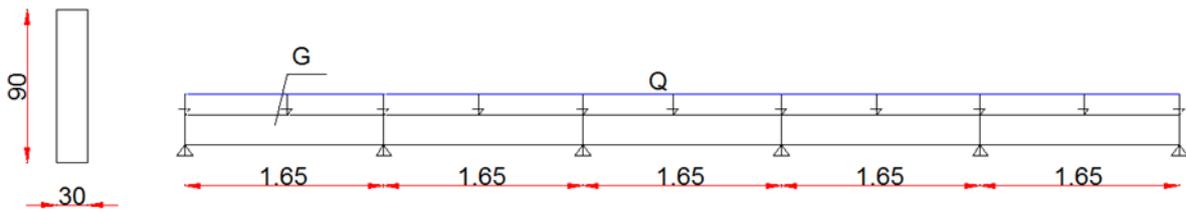


Figure 4.3. Chargement de l'entretoise

Pour le calcul des sollicitations, on utilise le logiciel SAP2000 :

$$Qu = \frac{G}{n \times L}$$

G : charge permanente pour une travée de tablier = 6051,58 KN

$$Qu = \frac{6051,58}{2 \times 33,40} = 90,59 \text{ KN/ml}$$

| | ELU (Kn.m) | ELS (Kn.m) |
|---------------------------------|------------|------------|
| Moment maximum en travée | 62,38 | 41,73 |
| Moment maximum en appuis | 74,23 | 49,66 |

Tableau 4.8. Moments fléchissant de l'entretoise à l'ELU et l'ELS

7.1. Ferrailage entretoise

a) ELU

| | En travée | En appuie |
|----------------------------|------------------------|------------------------|
| Mu(MN.m) | $62,38 \times 10^{-3}$ | $74,23 \times 10^{-3}$ |
| μ | 0,015 | 0,019 |
| α | 0,018 | 0,023 |
| Z(m) | 0,80 | 0,80 |
| Ast(cm²) | 2,24 | 2,66 |

Tableau 4.9. Ferrailage de l'entretoise à l'ELU

b) ELS

| | En travée | En appuie |
|--|------------------------|------------------------|
| Ms (MN.m) | $41,73 \times 10^{-3}$ | $49,66 \times 10^{-3}$ |
| σ_{bc} | 2,45 | 2,92 |
| σ_{st} | 176,21 | 156,49 |
| A_{st} (cm²) | 3,14 (4T10) | 3,14 (4T10) |
| Esp (cm) | 17 | 17 |

Tableau 4.10. Ferrailage de l'entretoise à l'ELS

7.2. Armatures de construction

La valeur de ces armatures est donnée par la formule suivante :

$$A_r = 25\% \times A_s \Rightarrow A_r = 0,25 \times 3,14 = 0,78 \text{cm}^2$$

On prend donc : 2T8=1,01cm²

1. INTRODUCTION

Le rôle d'un appareil d'appui, placé à la liaison d'une structure et son support, est de permettre dans certaines limites et sous certaines conditions :

- La transmission des efforts normaux avec un ou deux degrés de liberté dans le plan perpendiculaire.
- La liberté des déplacements et rotations tout en garantissant la stabilité d'ensemble.

1.1. Les appareils d'appuis en élastomère fretté

Ils sont constitués de feuillets d'élastomère (en général de néoprène) empilés avec interposition de tôles d'acier jouant le rôle de frettes (appui semi-fixe). Ils ne sont donc ni parfaitement fixes ni parfaitement mobiles.

Ce type d'appareils d'appuis est plus couramment employé pour tous les ouvrages en béton à cause des avantages qu'ils présentent :

- Facilité de mise en œuvre.
- Facilité de réglage et de contrôle.
- Ils permettent de répartir les efforts horizontaux entre plusieurs appuis.
- Ils n'exigent aucun entretien.
- Leur coût est relativement modéré.
- Ils transmettent les charges normales à leur plan, et ils permettent en même temps d'absorber par rotation et distorsion les déformations et translations de la structure.

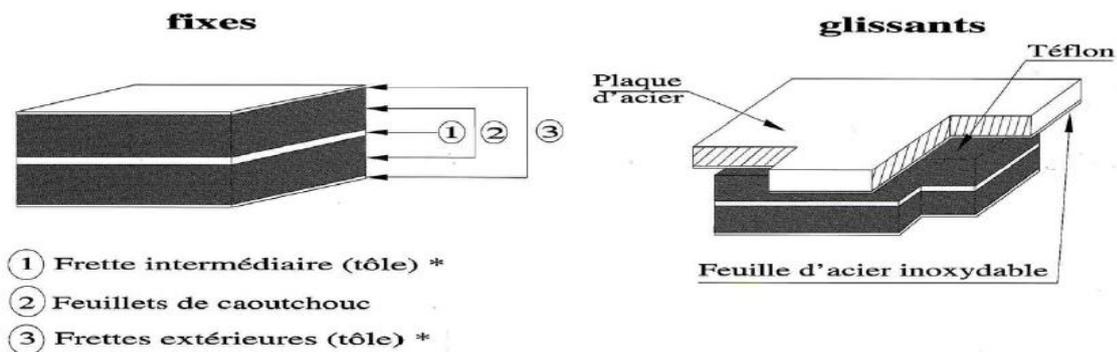


Figure 5.1. Appareils d'appuis en élastomère fretté(4)

2. DIMENSIONNEMENT DES APPAREILS D'APPUI

Réaction verticale à l'appui (calculé par le SAP2000) :

$$\begin{cases} N_{\max} = 1206,54 \text{ KN} \\ N_{\min} = 444,7 \text{ KN} \end{cases}$$

$$\text{Contrainte de compression : } \begin{cases} \bar{\sigma}_1 = 15000 \text{ KN/m}^2 \text{ en charge} \\ \bar{\sigma}_2 = 2000 \text{ KN/m}^2 \text{ à vide} \end{cases}$$

Tout d'abord on va calculer tous les déplacements possibles(4) :

2.1. Variation linéaire du tablier

Elle est due essentiellement au retrait, fluage et la température.

2.1.1. Déplacement due au retrait

On suppose que lors de la pose des poutres 60% du retrait total soient déjà effectuée. Soit :

$$\Delta l_r = -\frac{100-60}{100} \times \varepsilon_r \times L$$

$$\text{Avec } \begin{cases} L = 3 \times 33,4\text{m} \\ \varepsilon_r = 25 \times 10^{-5} \end{cases}$$

$$\Delta l_r = -\frac{40}{100} \times 25 \times 10^{-5} \times 100,2$$

$$\Rightarrow \Delta l_r = -10,02 \text{ mm}$$

2.1.2. Déplacement due au fluage

On suppose que 40% du fluage total s'est effectuée avant la pose des poutres.

On admet que fluage total est 2,5 fois de déformation élastique.

$$\Delta l_f = -\frac{100-40}{100} \times 2,5 \times \frac{\sigma_n}{E} \times L$$

$$\text{Avec } \begin{cases} \sigma_n = 6500 \text{ t/m}^2 : \text{Contraintes moyennes dans le béton} \\ E = 3,45 \times 10^5 \text{ t/m}^2 \\ L = 3 \times 33,4\text{m} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta l_r = -\frac{60}{100} \times 2,5 \times \frac{6500}{3,45 \times 10^5} \times 100,2$$

$$\Rightarrow \Delta l_r = -28,31 \text{ mm}$$

2.1.3. Déplacement due à la variation de la température

$$\text{Longue durée : } \Delta l_t = \pm 25 \times 10^{-5} \times L \quad \text{Pour } L=3 \times 33,4 \quad \Delta l_t = \pm 25,01 \text{ mm}$$

$$\text{Courte durée : } \Delta l_t = \pm 35 \times 10^{-5} \times L \quad \text{Pour } L=3 \times 33,4 \quad \Delta l_t = \pm 35,07 \text{ mm}$$

2.1.4. Total des variations linéaires

$$\text{Longue durée } \begin{cases} \Delta L_{\min} = -63,34 \text{ mm} \\ \Delta L_{\max} = 13,32 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\text{Courte durée } \begin{cases} \Delta L_{\min} = -73,40 \text{ mm} \\ \Delta L_{\max} = 326 \text{ mm} \end{cases}$$

2.2. Vérification des contraintes

- **Résistance à la compression**

D'après le RPOA on prend un coefficient de sécurité égal à 1,5

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\max} \leq \frac{\bar{\sigma}_1}{1,5} \\ \frac{\sigma_{\min}}{1,5} \geq \bar{\sigma}_2 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{N_{\max}}{a \times b} \leq \frac{15000}{1,5} \\ \frac{N_{\min}}{a \times b} \geq 1,5 \times 2000 \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow 0,120 \leq a \times b \leq 0,148 \text{m}^2$$

2.3. Dimensionnement en plan (a-b)

Le dimensionnement des appareils d'appuis est essentiellement basé sur la limitation des contraintes de cisaillement qui se développent dans l'élastomère au niveau des plans de frottement et qui sont dues aux efforts appliqués ou aux déformations imposées à l'appareil.

On suppose l'incompressibilité de l'élastomère.

Le module de déformation transversale G est de 0,9MPa pour les ponts routes.

On considère que $a < b$ l'épaisseur totale d'élastomère non compris les frettes $T = n \times t$

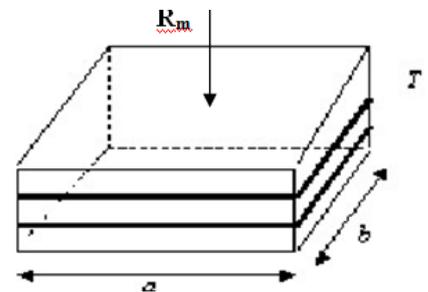
D'où n : est le nombre de feuillets élémentaires et t : leur épaisseur.

2.4. Détermination des dimensions de l'appareil d'appui

Selon le bulletin technique N°04 de SETRA.

- **Aire de l'appareil d'appui :**

$$a \times b \geq \frac{R_{\max}}{\sigma_{\text{moy}}}$$



a: Côte parallèle à l'axe horizontale de l'ouvrage.

b: Côte perpendiculaire à l'axe horizontal de l'ouvrage.

Contrainte limite de compression de l'appareil d'appui est de 15000 KN/m²

R_{\max} : réaction verticale maximale sur l'appui

$$R_{\max} = 1206,54 \text{KN}$$

σ_{moy} : contrainte moyenne de compression du néoprène

$$\sigma_{\text{moy}} = 150 \text{Kg} / \text{cm}^2$$

$$\Rightarrow a \times b \geq \frac{1206,54}{15000} = 804,36 \text{cm}^2$$

On choisit : $a = 30 \text{cm}$ et $b = 40 \text{cm}$

$$a \times b = 30 \times 40 = 1200 \text{cm}^2 > 804,36 \text{cm}^2$$

- **Epaisseur nette de l'élastomère**

La condition à vérifier est : $T \geq U1 / 0,5$

$U1$ = Déformation lente (retrait, fluage, température)

$$U1 = 1,332 \text{ cm} = 13,32\text{mm.}$$

$$T \geq 13,32 / 0,5 = 26,64\text{mm.}$$

On prendra : $T = 48 \text{ mm} \Rightarrow T = n \times t$

$$\text{Avec } \begin{cases} t = 12 \text{ mm (hauteur des feuillets, fixée par les normes)} \\ n = 4 \text{ (Nombre de feuillets)} \end{cases}$$

\Rightarrow Constitué de 4 feuillets de 12 mm chacun.

- **Dimensions en plan de l'appareil**

Il faut respecter : $\begin{cases} \text{La condition de non flambement.} \\ \text{L'épaisseur minimale.} \end{cases}$

Condition : $\frac{a}{10} \leq T \leq \frac{a}{5} \Rightarrow$ soit : $3 \leq T \leq 6\text{cm} \Rightarrow$ condition vérifiée

- **Epaisseur des frettes**

L'épaisseur de la frette doit respecter les deux conditions suivantes :

$$\begin{cases} t_s > \frac{a}{\beta} \times \frac{\sigma_m}{\sigma_e} & \text{où : } \sigma_e = 2200 \text{ Kg/mm}^2 \\ t_s \geq 2\text{mm} \end{cases}$$

$\sigma_e = 2200 \text{ Kg/cm}^2$ (Acier E24-1: $e < 3\text{mm}$ {SETRA Bulletin technique})

σ_e : Limite d'élasticité en traction de l'acier constructif des frettes.

$$\sigma_e = 2200 \text{ kg/cm}^2$$

β : coefficient de forme

$$\beta = \frac{a \times b}{(a+b)2t} = \frac{30 \times 40}{(30+40)2 \times 1,2} = 7,14$$

$$\sigma_m = \frac{R_{max}}{a \times b} = \frac{1206,54 \times 10^2}{30 \times 40} = 100,545 \text{ kg/cm}^2$$

$$t_s \geq \frac{30}{7,14} \times \frac{100,545}{2200} \quad \text{Soit } t_s \geq 0,192\text{cm}$$

On prend : $t_s = 2,5\text{mm}$

Donc l'appareil d'appuis à choisir est en élastomère fretté avec les caractéristiques suivantes :

$$300 \times 400 \times 4(12) + 5(2,5)$$

3. Vérification de l'appareil d'appuis

Pour la vérification de l'appareil, il faut établir la répartition des efforts Horizontaux, cette dernière, au niveau des appareils d'appuis se fera avec l'influence des déformations des appuis.

3.1. La répartition des efforts horizontaux

3.1.1. Evaluation du point fixe

NB : 3 joints de chaussée sont prévus ; 1 joint à chaque extrémités entre le tablier et chaque culée, alors que le troisième joint se trouve à mi-travée ($x= 100,2m$).

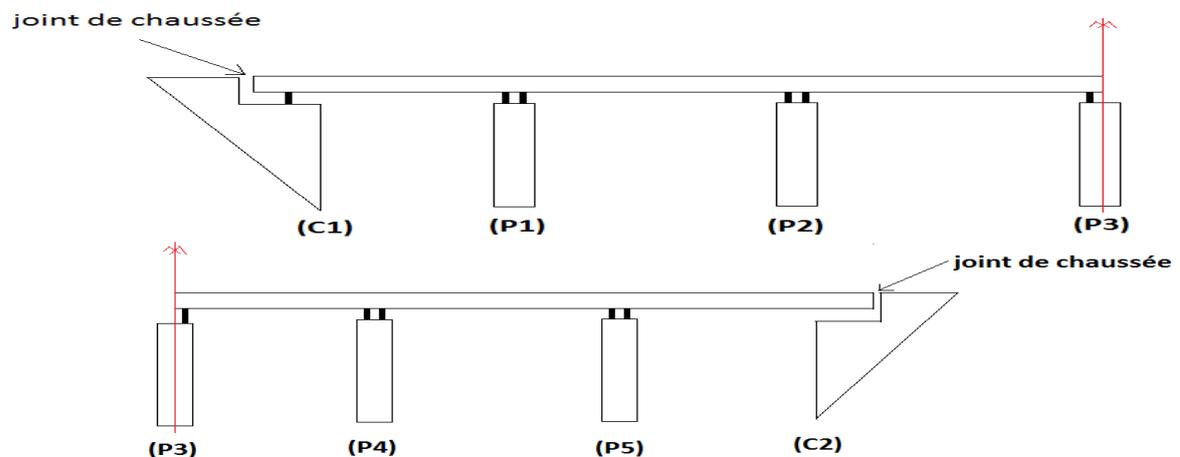


Figure 5.2. Position du joint de chaussée

$$H_i = \delta_i \times K_i$$

Avec :

δ_i : la déformation de l'appareil d'appui i

$$\Rightarrow \delta_i = \varepsilon t (x_i - x)$$

$$\Rightarrow \delta_i = \delta_{1i} + \delta_{2i} + \delta_{3i} = \frac{T_i}{n \times G \times A_i} + \frac{h^3}{3 \times E \times I_i} + \frac{4 \times h^2}{n \times R_i \times 3 \times E}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{1i} = \text{dû à l'élastomère} \\ \delta_{2i} = \text{dû à l'appui} \\ \delta_{3i} = \text{dû à la fondation} = 0 \quad (\text{La fondation de la pile est supposée encastrée dans les pieux, il ne peut pas y avoir de déplacement}) \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \delta_i = \delta_{1i} + \delta_{2i} = \frac{T_i}{n \times G \times A_i} + \frac{h^3}{3E \times I_i}$$

K_i : la rigidité de l' i ème appui

$$\Rightarrow K_i = \frac{1}{\delta_i}$$

T_i : épaisseur de l'élastomère.

I_i : moment d'inertie.

Etude de l'appareil d'appui

A_i : surface de l'élastomère.

h_i : hauteur de la pile.

G : module de cisaillement.

n : n^{bre} de poutre par appui.

Soit H_i le pourcentage de l'effort horizontal (h) repris par le i ^{ème} appui

$$H_i = H \frac{K_i}{\sum K_i}$$

Remarque : les efforts horizontaux à prendre en compte dans ce cas sont :

- variation linéaire du tablier.
- Freinage.
- Séisme.

- Appareil d'appui : 300×400×60,5

$$T_i = 4,8 \times 10^{-3} \text{ m} ; A_i = 0,12 \text{ m}^2$$

- Moment d'inertie d'un fut : $I_F = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{\pi(1,2)^4}{64} = 0,101 \text{ m}^4$

- Moment d'inertie de la pile : $I = 4 \times I_F = 0,404 \text{ m}^4$

- Chargement statique (Lent) : $G = 90 \text{ t/m}^2$, $E = 3450000 \text{ t/m}^2$

$$\delta_{11} = \delta_{18} = \frac{T_1}{n \times G \times A_1} = \frac{5,8 \times 10^{-3}}{6 \times 90 \times 0,12} = 8,9 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

$$\delta_{12} = \delta_{13} = \delta_{14} = \delta_{15} = \delta_{16} = \delta_{17} = \frac{T_2}{n \times G \times A_2} = \frac{5,8 \times 10^{-3}}{12 \times 90 \times 0,12} = 4,4 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

$$\delta_{22} = h_2^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(6,12)^3}{3 \times 3450000 \times 0,404} = 5,48 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

$$\delta_{23} = h_3^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(6)^3}{3 \times 3450000 \times 0,404} = 5,16 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

$$\delta_{24} = \delta_{25} = h_3^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(5,88)^3}{3 \times 3450000 \times 0,404} = 4,86 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

$$\delta_{26} = h_3^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(5,05)^3}{3 \times 3450000 \times 0,404} = 3,08 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

$$\delta_{27} = h_5^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(4,85)^3}{3 \times 11,5 \times 100000 \times 0,404} = 2,72 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

$$\delta_{21} = \delta_{28} = h_5^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(0)^3}{3 \times 11,5 \times 100000 \times 0,404} = 0 \text{ m/t}$$

- Chargement dynamique (instantané) : $G = 120 \text{ t/m}^2$, $E = 1150000 \text{ t/m}^2$

$$\delta_{11} = \delta_{18} = \frac{T_1}{n \times G \times A_1} = \frac{5,8 \times 10^{-3}}{6 \times 120 \times 0,12} = 6,71 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

Etude de l'appareil d'appui

$$\delta_{12} = \delta_{13} = \delta_{14} = \delta_{15} = \delta_{16} = \delta_{17} = \frac{T2}{n \times G \times A2} = \frac{5,8 \times 10^{-3}}{12 \times 120 \times 0,12} = 3,35 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

$$\delta_{22} = h_2^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(6,12)^3}{3 \times 1150000 \times 0,404} = 1,64 \times 10^{-4} \text{ m/t}$$

$$\delta_{23} = h_3^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(6)^3}{3 \times 1150000 \times 0,404} = 1,54 \times 10^{-4} \text{ m/t}$$

$$\delta_{24} = \delta_{25} = h_3^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(5,88)^3}{3 \times 1150000 \times 0,404} = 1,45 \times 10^{-4} \text{ m/t}$$

$$\delta_{26} = h_3^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(5,05)^3}{3 \times 1150000 \times 0,404} = 9,24 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

$$\delta_{27} = h_5^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(4,85)^3}{3 \times 1150000 \times 0,404} = 8,18 \times 10^{-5} \text{ m/t}$$

$$\delta_{21} = \delta_{28} = h_5^3 \times \frac{1}{3EI} = \frac{(0)^3}{3 \times 11,5 \times 100000 \times 0,404} = 0 \text{ m/t}$$

Etude de l'appareil d'appui

| | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|------------|------------|-------------|------------|--|------------|------------|------------|------------|
| appui | n% | culée 1 | pile 1 | pile 2 | pile 3 | | pile 3 | pile 4 | pile 5 | culée 2 |
| distance | x_i | 0 | 33,4 | 66,8 | 100,2 | | 0 | 33,4 | 66,8 | 100,2 |
| T_i | | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 |
| n | | 6 | 12 | 12 | 12 | | 12 | 12 | 12 | 6 |
| A_i | | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| h | | 0 | 6,12 | 6 | 5,88 | | 5,88 | 5,05 | 4,85 | 0 |
| l_i | | 0.0001 | 0,8873 | 0,8873 | 0,8873 | | 0,8873 | 0,8873 | 0,8873 | 0.0001 |
| E | lent | 1150000 | 1150000 | 1150000 | 1150000 | | 1150000 | 1150000 | 1150000 | 1150000 |
| | inst | 3450000 | 3450000 | 3450000 | 3450000 | | 3450000 | 3450000 | 3450000 | 3450000 |
| G | lent | 90 | 90 | 90 | 90 | | 90 | 90 | 90 | 90 |
| | inst | 120 | 120 | 120 | 120 | | 120 | 120 | 120 | 120 |
| δ_{1i} | lent | 0,00089506 | 0,00044753 | 0,000447531 | 0,00044753 | | 0,00044753 | 0,00044753 | 0,00044753 | 0,00089506 |
| | inst | 0,0006713 | 0,00033565 | 0,000335648 | 0,00033565 | | 0,00033565 | 0,00033565 | 0,00033565 | 0,0006713 |
| δ_{2i} | lent | 0 | 7,488E-05 | 7,05609E-05 | 6,6411E-05 | | 6,6411E-05 | 4,2071E-05 | 3,7268E-05 | 0 |
| | inst | 0 | 2,496E-05 | 2,35203E-05 | 2,2137E-05 | | 2,2137E-05 | 1,4024E-05 | 1,2423E-05 | 0 |
| δ_i | lent | 0,00089506 | 0,00052241 | 0,000518092 | 0,00051394 | | 0,00051394 | 0,0004896 | 0,0004848 | 0,00089506 |
| | inst | 0,0006713 | 0,00036061 | 0,000359168 | 0,00058035 | | 0,00058035 | 0,00053167 | 0,00052207 | 0,0006713 |
| K_i | lent | 1117,24138 | 1914,20288 | 1930,159963 | 1945,74399 | | 1945,74399 | 2042,47519 | 2062,71127 | 1117,24138 |
| | inst | 1489,65517 | 2773,0937 | 2784,208902 | 1723,08746 | | 1723,08746 | 1880,85464 | 1915,46374 | 1489,65517 |
| $x_i * K_i$ | lent | 0 | 63934,376 | 128934,6855 | 194963,547 | | 0 | 68218,6712 | 137789,113 | 111947,586 |
| | inst | 0 | 92621,3295 | 185985,1546 | 172653,364 | | 0 | 62820,5449 | 127952,978 | 149263,448 |
| H% | lent | 0,16174679 | 0,27712558 | 0,279435741 | 0,28169189 | | 0,27144215 | 0,28493669 | 0,28775974 | 0,15586141 |
| | inst | 0,16985718 | 0,31620062 | 0,317468021 | 0,19647418 | | 0,24583713 | 0,26834616 | 0,27328393 | 0,21253277 |

Tableau 5.1. Déplacement et rigidité de l'appareil d'appui et des appuis

Etude de l'appareil d'appui

$$X_0 = \frac{\sum(K_i \cdot x_i)}{\sum(K_i)} \quad , \quad K_i = 1 / \delta_i \quad , \quad H_i = (K_i / \sum K_i)$$

| les appuis C1 P1 P2 P3 | | | les appuis P3 P4 P5 C2 | | |
|------------------------|------|------------|------------------------|------|------------|
| $\sum K_i$ | lent | 6907,3482 | $\sum K_i$ | lent | 7168,17182 |
| | inst | 8770,04523 | | inst | 7009,06101 |
| Xi*K | lent | 387832,609 | Xi*K | lent | 317955,37 |
| | inst | 451259,848 | | inst | 340036,971 |
| H% | lent | 1 | H% | lent | 1 |
| | inst | 1 | | inst | 1 |
| X0 (C.E) | lent | 56,1478295 | X0 (C.E) | lent | 44,3565498 |
| | inst | 51,4546774 | | inst | 48,5139122 |

Tableau 5.2. Centre élastique

3.1.2. Efforts dues aux charges dynamiques

Les efforts horizontaux dus aux charges dynamiques (Freinage, vent, séisme) sont exercés sur le tablier et transmis aux différents appuis, la répartition se fait suivant les rigidités des différents appuis.

- **Effort de freinage**

La formule qui détermine la force de freinage :

$$H_{fr} = H_{Bc} \times \frac{K_i}{\sum K_i} = H_{Bc} \times H\%$$

Avec :

$$H_{Bc} = \text{poids d'un camion} \times b_c = 300 \times 1,2 = 360 \text{ KN} = 36 \text{ t}$$

Répartition de l'effort de freinage de Bc sur les appuis:

| appui | C1 | P1 | P2 | P3 | | P3 | P4 | P5 | C2 |
|---------------|-------|--------|--------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| Hfr(t) | 6,115 | 11,383 | 11,429 | 7,073 | | 8,850 | 9,660 | 9,838 | 7,651 |

Tableau 5.3. Répartition de l'effort de freinage de Bc sur piles et culées

- **Effort du au vent**

L'action du vent est perpendiculaire à l'axe horizontal de l'ouvrage, on considère une pression de **3KN/m²**.

L'effort du vent est :

$$H_v = f \times q \times S$$

Avec :

S : La section latérale sur laquelle agit le vent.

$$S = 33,4 \times (1,5 + 0,085 + 0,25) = 61,289 \text{ m}^2$$

$$q = 3 \text{ KN/m}^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f = \frac{1}{2} \text{ en phase de chantier} \\ f = \frac{2}{3} \text{ pour le reste} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H_v = 9,19 \text{ t en phase de chantier} \\ H_v = 12,25 \text{ t pour le reste} \end{array} \right.$$

3.1.3. Variation linéaire du tablier

La valeur de la variation linéaire du tablier est donnée par :

$$\Delta L_i = \Delta L_t \cdot (x_i/L) \quad \text{avec} \quad \Delta L_t = 0,0734 \text{ m}$$

$$L = 100,2 \text{ m}$$

$$G = 90 \text{ t/m}^2$$

$$A = 0,12 \text{ m}^2$$

$$T = 5,8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$H_{vlt} = \left(\frac{n_i \times G_i \times A_i}{T_i} \right) \times \Delta L_i$$

| Appui | C1 | P1 | P2 | P3 | | P3 | P4 | P5 | C2 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|--------|
| Xi | 51,455 | 18,055 | 15,345 | 48,745 | | 48,514 | 15,114 | 18,286 | 51,686 |
| ΔLi (mm) | 0,038 | 0,013 | 0,011 | 0,036 | | 0,036 | 0,011 | 0,013 | 0,038 |
| H_{vlt} | 24,822 | 17,419 | 14,805 | 23,515 | | 23,403 | 14,582 | 17,642 | 24,933 |

Tableau 5.4. Répartition de l'effort Variation linéaire

3.1.4. Chargement dynamique

Lorsqu'un tablier repose sur des appareils d'appui en élastomère fretté, ce sont ces derniers qui apportent le plus de souplesse à l'ouvrage.

Il est donc primordial de les prendre en compte le modèle dynamique permettant de calculer les périodes propres. En théorie, l'appareil d'appui doit être modélisé par un ressort multidirectionnel, fonctionnant aussi bien en traction-compression qu'en rotation, c'est-à-dire par six raideurs.

Etude de l'appareil d'appui

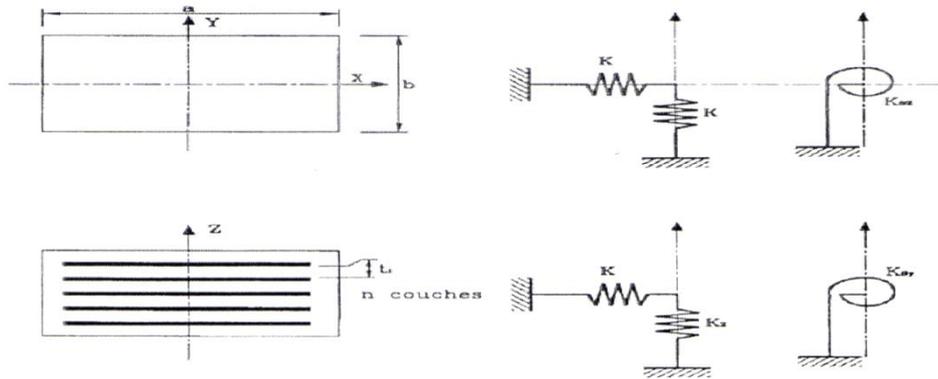


Figure 5.3. Modélisation de l'appareil d'appui par un ressort

Les raideurs doivent être calculées comme cela est indiqué dans le tableau suivant. Dans la grande majorité des cas, l'appareil d'appui peut être considéré comme infiniment rigide en direction vertical et infiniment souple en rotation, ce qui conduit à la formulation simplifiée de la troisième colonne :

| Raideur | Formule complète selon les notations de NF EN 1337-3 | Formule simplifiée |
|----------------------------|--|---------------------|
| K_x et K_y | $\frac{A G_b}{T_e}$ | $\frac{A G_b}{T_e}$ |
| K_z | $\left[\sum \frac{t_i}{A'} \left(\frac{1}{5 * G_b * S_1^2} + \frac{1}{E_b} \right) \right]^{-1}$ | ∞ |
| K_{θ} rectangulaire | $G_b \frac{a'^5 b'}{n * t_i^3 * K_s}$ | 0 |
| K_{θ} circulaire | $G_b \frac{\pi * D'^6}{512 * n * t_i^3}$ | 0 |
| $K_{\theta z}$ | - | 0 |

Tableau 5.5. Les raideurs des appareils d'appuis

Pour notre cas on prend les formules simplifiées :

$$K_x = K_y = \frac{A G_b}{T_e}$$

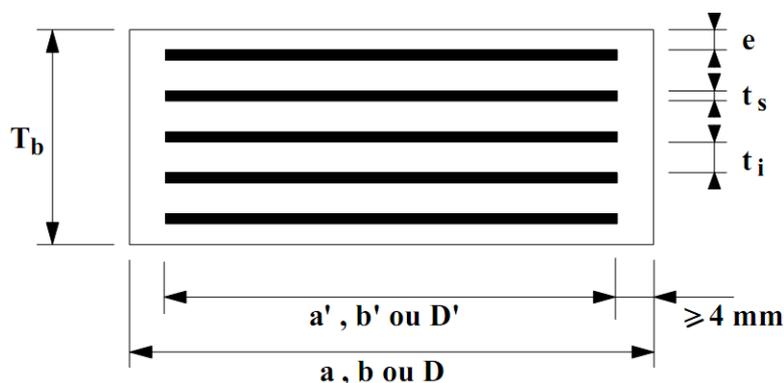


Figure 5.4. Définition géométrique de l'appareil d'appui

Epaisseur nominale totale d'élastomère :

$$T_e = n t_i + 2e$$

$$K_x = K_y = \frac{0,12 \times 120}{0,048}$$

$$K_x = K_y = 3000 \text{ KN/m}$$

4. VERIFICATION DES CONTRAINTES

4.1. Limitation des contraintes de cisaillement

4.1.1. Sollicitation sous charge verticale

$$\sigma_m = \frac{N_{\max}}{a \times b} \leq 15000 \text{ KN/m}^2$$

σ_m : Contrainte de compression sous N_{\max}

$$N_{\max} = 1206,54 \text{ KN}$$

$$\sigma_m = \frac{1206,54}{0,12} = 10054,5 \leq 15000 \text{ KN/m}^2 \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

τ : Contrainte de cisaillement qui apparait au niveau du frettage.

$$\tau = \frac{1,5 \sigma_m}{B} < 2800 \text{ KN/m}^2.$$

Avec :

$$B = \frac{a \times b}{2t(a+b)} = \frac{0,30 \times 0,4}{2 \times 0,012 \times (0,30 + 0,4)} \Rightarrow B = 7,14$$

$$\tau = \frac{1,5 \times 10054,5}{7,14} \Rightarrow \tau = 2112,2 \text{ KN/m}^2 \leq 2800 \text{ KN/m}^2 \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

4.1.2. Sollicitation due à un déplacement ou un effort horizontal

Sous un déplacement lent (déformation lente)

$$\tau_H = \frac{G \times \mu}{T} < 0,5 G = 450 \text{ KN/m}^2$$

$$\tau_H = \frac{90 \times 0,038}{0,082} = 417,07 \text{ KN/m}^2 < 450 \text{ KN/m}^2 \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

• Condition de non glissement

La stabilité au glissement de l'appareil d'appui doit être justifiée en tenant compte de la composante verticale du séisme.

On vérifiera :

$$- \sigma_{\min} \geq 2000 \text{ KN/m}^2.$$

$$\sigma_{\min} = \frac{N_{\min}}{a \times b} = \frac{444,7}{0,30 \times 0,4} \Rightarrow \sigma_{\min} = 3705,8 \text{ KN/m}^2 \geq 2000 \text{ KN/m}^2 \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

$$- H < f \times N$$

Avec :

H : L'effort horizontal (effort de freinage)

$$H = 36 \text{ t}$$

N: L'effort de compression vertical

$$N = 120,65 \text{ t}$$

f : Le coefficient de frottement

$$f = 0,10 + \frac{0,6}{\sigma_m}$$

Lorsque les faces de l'appareil en contact avec la structure sont des feuilles d'élastomère.

$$f = 0,26$$

$$H = 30 \text{ t} < 0,26 \times 120,65 = 31,36 \text{ t} \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

5. EFFORT DUE AU SEISME

Le séisme est traité comme une action accidentelle, cette dernière est déterminée selon le règlement parasismique des ouvrages d'arts RPOA.

| | |
|--|------------|
| L'ouvrage étudié est un pont important | Groupe 2 |
| L'ouvrage est situé dans la wilaya de Naama | Zone I |
| Le coefficient d'accélération | A=0,12 (g) |

Tableau 5.6. Classification du pont

$$F = M \times S_{ae}(T)$$

Avec :

S_{ae} : Le spectre de réponse élastique pour les deux composantes horizontales et vertical est donné en fonction de la période élastique (T) et du taux d'amortissement (ξ) de l'ouvrage.

a) Composantes horizontales

$$S_{ae}(T, \zeta) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = \begin{cases} AgS \left(1 + \frac{T}{T_1} (2,5\eta - 1) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta AgS & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta AgS \left(\frac{T_2}{T} \right) & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2,5\eta AgS \left(\frac{3T_2}{T} \right) & T \geq 3s \end{cases}$$

g : accélération de la pesanteur ($g=9,81\text{m/s}^2$)

A : coefficient d'accélération (A=0,12)

S : coefficient de site

Etude de l'appareil d'appui

T_1, T_2 : période caractéristique associées à la catégorie de site qui est donnée par le tableau suivant :

| Site | S1 | S2 | S3 | S4 |
|------|------|------|-----|-----|
| T1 | 0,15 | 0,15 | 0,2 | 0,2 |
| T2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,7 |
| S | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 |

Tableau 5.7. Valeurs de T1,T2 et S pour la composante horizontale(4)

$$\text{Catégorie de site S2} \begin{cases} T_1 = 0,15 \\ T_2 = 0,40 \\ S = 1,1 \end{cases}$$

ζ : taux d'amortissement Pour le béton armé : $\zeta = 5$

η : facteur de correction de l'amortissement ($\eta = \sqrt{7/(2 + \zeta)}$)=1

b) Composantes verticales

$$Sae^v(T, \zeta) \left(\frac{m}{s^2} \right) = \begin{cases} Ag\alpha \left(1 + \frac{T}{T_1} (2,5\eta - 1) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta Ag\alpha & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta Ag\alpha \left(\frac{T_2}{T} \right) & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2,5\eta Ag\alpha \left(\frac{3T_2}{T} \right) & T \geq 3s \end{cases}$$

M : La masse du tablier+masse de la moitié supérieure des piles

Sae(T) : L'accélération spectrale du spectre à la période fondamentale T

T : Période fondamentale $T=2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$

T1,T2 : période caractéristique associées à la catégorie de site qui est donnée par le tableau suivant :

| Site | S1 | S2 | S3 | S4 |
|------|------|------|-----|-----|
| T1 | 0,15 | 0,15 | 0,2 | 0,2 |
| T2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,4 |
| S | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tableau 5.8. valeurs de T1,T2 et S pour la composante verticale(4)

K : Raideur du système

Etude de l'appareil d'appui

Cette force horizontale se répartit sur chaque appui (i) : $F(i) = \frac{K_i}{K} \times F$

Avec :

K_i : Raideur pour chaque appui

F : La force horizontale appliquée au tablier.

– Pour $L=3 \times 33,4$: (C1, P1, P2, P3)

$$M=2347,7705 \text{ t} \quad ; \quad K = 8770,045 \times 10^{-1}$$

$$\Rightarrow T = 1,027 \text{ s}$$

On a: $F_h = M \times S_{ae}(T) / g$

$$S_{ae}(T) / g = 0,128 \text{ Horizontal} \longrightarrow F_h = 2347,7705 \times 0,128 = 300,51 \text{ t}$$

– Pour $L=3 \times 33,4$: (P3, P4, P5, C2)

$$M=2323,35 \text{ t} \quad ; \quad K = 7009,061 \quad ; \quad T = 1,143 \text{ s}$$

$$S_{ae}(T) / g = 0,1154 \text{ Horizontal} \longrightarrow F_h = 2323,35 \times 0,1154 = 267,185 \text{ t}$$

| appui | C1 | P1 | P2 | P3 | | P3 | P4 | P5 | C2 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|--------|
| Hs | 45,383 | 84,484 | 84,823 | 52,495 | | 73,877 | 80,641 | 82,125 | 63,868 |

Tableau 5.9. Répartition des efforts séismiques

c) Sécurité au flambement

On doit vérifier : $\gamma_s \times p_u < P_c$

Avec :

$\gamma_s = 3$: Coefficient partiel de sécurité.

p_u : Valeur maximal des charges verticales sous les combinaisons d'état limite ultime

P_c : La charge critique de l'appareil d'appui est donnée par la formule suivante :

$$P_c = 4GBS^2 d/h$$

B: Aire nominale en plan de l'appui (B=axb)

d: Somme d'une épaisseur de frette et d'une épaisseur d'élastomère

h : Hauteur totale de l'appareil d'appui

G: Module de cisaillement

$$T : \text{Période fondamentale } T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$$

$$S : \text{facteur de forme } S = \frac{a \times b}{(a+b) \times 2t} = 7,14$$

$$P_c = 4 \times 120 \times (7,14)^2 \times 0,0505 / 0,085 = 14538,18 \text{ t}$$

$$3 \times 1206,5 = 3619,5 < 14538,18 \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

6. LES DES D'APPUIS

6.1. Fonction des dés d'appuis

- Ils matérialisent l'emplacement des appareils d'appui.
- Ils permettent de réaliser assez facilement une surface plane et bien réglée.
- Ils assurent la mise hors d'eau des appareils d'appui, principalement.
- Ils permettent de réserver une hauteur libre de valeur donnée entre l'appui et l'intrados du tablier.

6.2. Dimensionnement des dés d'appuis

D'après le document SETRA le dimensionnement des dés d'appuis inférieurs et supérieurs présenteront par rapport à l'appareil d'appui un débordement de 5cm.

$$A = a + 10 \text{ cm} = 40\text{cm}$$

$$B = b + 10\text{cm} = 50\text{cm}$$

$$H_i > 5\text{cm}$$

$$H_s > 2\text{cm}$$

$$H = H_i + H_s - T$$

Nous prendrons

$$H_i = 10\text{cm}$$

$$H_s = 10\text{cm}$$

$$T = 8,5 \text{ cm}$$

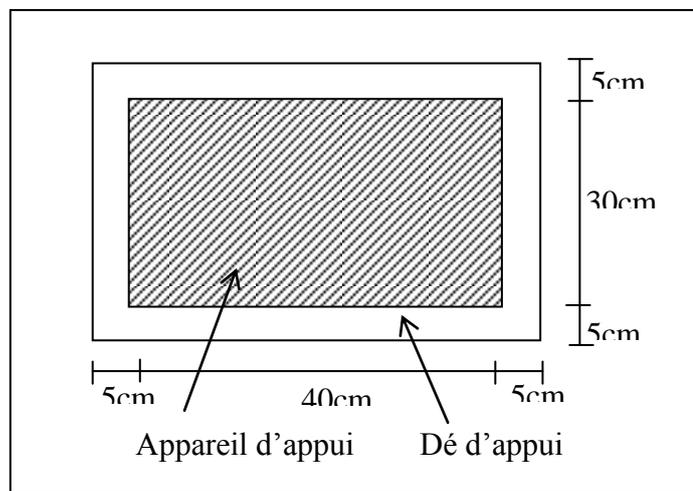


Figure 5.5. Les dimensions des dés d'appuis

6.3. Ferrailage des dés d'appui

On prend des armatures capables de reprendre 4% de N_{\max}

$$A = \frac{0,04 \times N_{\max}}{\bar{\sigma}_{st}}$$

Avec :

$\bar{\sigma}_{st}$: Contrainte limite de traction des aciers

On a une fissuration préjudiciable

Donc :

$$\bar{\sigma}_{st} = \min \left(\frac{2}{3} f_e; 110 \sqrt{\mu \times f_{t28}} \right) = \min \left(\frac{2}{3} 400; 110 \sqrt{1,6 \times 2,7} \right) = 22863,07 \text{ t/m}^2$$

n : Coefficient de fissuration

$$A = \frac{0,04 \times 120,65}{22863,07} = 2,11 \text{ cm}^2$$

On prend : $6\emptyset 8 = 3,02 \text{ cm}^2$ dans les deux sens.

7. LES JOINTS DE CHAUSSEE

7.1. Définition

Les joints de chaussée sont conçus et réalisés pour assurer la continuité de circulation entre deux éléments métalliques identiques solidarisés aux deux parties d'ouvrage au moyen de tiges précontraintes. Dans la plus part des cas, ils sont insérés entre les éléments métalliques, un profil en élastomère qui empêche la pénétration des corps étrangers(3).

7.2. Les différents types de joints

Le choix d'un type de joint de chaussée fait référence à une classification basée sur la notion de robustesse. On distingue ainsi :

- Les joints lourds, pour les chaussées supportant un trafic journalier supérieur à 3000 véhicules (ou de volume inférieur, mais à fort pourcentage de poids lourds) ;
- Les joints semi lourd, pour un trafic compris entre 1000 et 3000 véhicules par jours
- Les joints légers, pour un trafic inférieur à 1000 véhicules par jour.

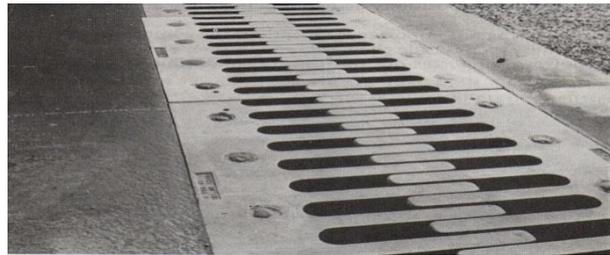


Figure 5.6. Joint de la chaussée

7.3. Calcul des joints de chaussée

Le calcul du joint se base principalement sur les deux combinaisons suivantes :

- Le déplacement dû aux variations linéaires (fluage, retrait, température) plus le déplacement dû au freinage.
- Le déplacement dû aux variations linéaires plus le déplacement dû au séisme.

$$\text{On doit vérifier } \begin{cases} \Delta T + \Delta_{\text{freinage}} < w \\ \Delta T + \Delta_{\text{séisme}} < 1,3w \end{cases}$$

w: Le déplacement caractérise le type de joint de chaussée

On prend $w=10$ cm

$$\Delta T = \Delta_{\text{ret}} + \Delta_{\text{fluage}} + \Delta_{\text{température}} = 7,34 \text{ cm}$$

$$\text{a) } \Delta_{\text{freinage}} = \frac{T \times H_{\text{frei}}}{GS} = \frac{0,048 \times \frac{30}{6}}{80 \times 0,12} = 0,025 \text{ m} = 2,50 \text{ cm}$$

G : module de déformation transversale ($G = 80 \text{ t/m}^2$)

S : $0,12 \text{ m}^2$

Etude de l'appareil d'appui

T : 0,048 m

$$\mathbf{b)} \Delta_{\text{séisme}} = \frac{T \times H_s}{G \times S} = \frac{0,048 \times 7,38}{80 \times 0,12} = 0,036 \text{ m} = 3,69 \text{ cm}$$

$\Delta T + \Delta_{\text{freinage}} = 7,34 + 2,50 = 9,84 \text{ cm} < w = 10 \text{ cm} \Rightarrow$ condition vérifiée.

$\Delta T + \Delta_{\text{séisme}} = 7,34 + 3,69 = 11,03 \text{ cm} < w = 13 \text{ cm} \Rightarrow$ condition vérifiée.

Puisque on a un pont à poutre en béton précontraintes, isostatique on va disposer les joints de chaussée sur les extrémités de chaque travée.

1. INTRODUCTION

La pile est un élément fondamental de la structure globale du pont, c'est un appui intermédiaire qui a pour rôle de supporter le tablier et de transmettre les charges au sol par l'intermédiaire des fondations. Elle se compose d'un chevêtre, d'un corps de pile, et d'une semelle liant les pieux. La pile est soumise à des charges horizontales telles que (freinage, séisme, vent....) et des charges verticales telles que (son poids propre, poids du tablier..)(3).

2. CRITERE DE DIMENSIONNEMENT DE LA PILE

La morphologie d'une pile dépend de nombreux facteurs, en particuliers :

- La profondeur de la brèche à franchir ;
- Le type de tablier a porté ;
- Résistance mécanique et robustesse ;
- Facteur d'esthétique.

3. PRE DIMENSIONNEMENT

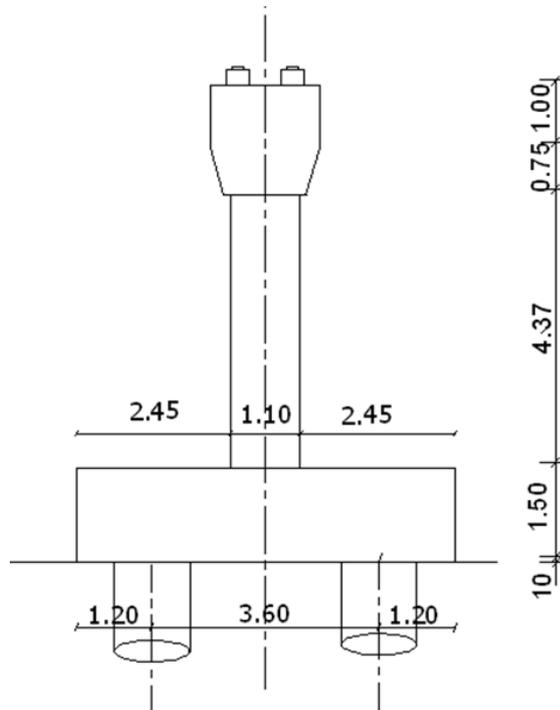


Figure 6.1. Plan coffrage pour les piles types

| Désignation | Pile 1 | Pile 2 | Pile 3 | Pile 4 | Pile 5 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Hauteur de la pile (m) | 6,12 | 6 | 5,88 | 5,05 | 4,85 |
| Hauteur du Fût (m) | 4,37 | 4,25 | 4,13 | 3,3 | 3,1 |

Tableau 6.1. Récapitulatif des hauteurs des futs et piles

4. DETERMINATION DES EFFORTS

4.1. Efforts verticaux

- Poids propre du tablier : $G=605,158$ t/travée
- Poids propre du chevêtre : $1,75 \times 1,75 \times 10 \times 2,5=76,56$ t
- Poids propre du fut : $\frac{\pi}{4} \times 1,10^2 \times 4,37 \times 2,5=10,38$ t
- Poids propre de la semelle : $6 \times 1,50 \times 13,20 \times 2,5=297$ t
- Surcharge Mc120 : 118,60 t

4.2. Efforts horizontaux

- Variation linéaire du tablier : 17,41 t
- Freinage : 11,38 t
- Séisme : 84,82 t

4.3. Efforts sollicitant la pile

Combinaison fondamentale : $ELU = 1,35G + 1,5Q + 1,35 Mc120 + 0,8Qvl$

| éléments | Coéf | V(t) | H(t) | Z(m) | M/0(t/m) |
|---------------------|------|----------|-------|------|----------|
| Réaction de tablier | 1,35 | 816,96 | / | 0 | 0 |
| Surcharge Mc120 | 1,35 | 160,11 | / | 0 | 0 |
| Chevêtre | 1,35 | 102,006 | / | 0 | 0 |
| Fut | 1,35 | 14,013 | / | 0 | 0 |
| Variation linéaire | 0,8 | / | 13,92 | 6,12 | 85,19 |
| Total | | 1093,089 | 13,92 | | 85,19 |

Tableau 6.2. Efforts sollicitant la pile à l'ELU

Etude des piles

Combinaison fondamentale : $ELS = G + Q + Mc120 + 0,6Qv1$

| éléments | Coéf | V(t) | H(t) | Z(m) | M/0(t/m) |
|---------------------|------|---------|-------|------|----------|
| Réaction de tablier | 1 | 605,158 | / | 0 | 0 |
| Surcharge Mc120 | 1 | 118,60 | / | 0 | 0 |
| Chevêtre | 1 | 76,56 | / | 0 | 0 |
| Fut | 1 | 10,38 | / | 0 | 0 |
| Variation linéaire | 0,6 | / | 10,44 | 6,12 | 63,92 |
| Total | | 810,698 | 10,44 | | 63,92 |

Tableau 6.3. Efforts sollicitant de la pile à l'ELS

Combinaison accidentelle : $ELU \text{ acc} = 1,036 G + Q + 0,2 Mc120 + Fh \text{ sismique}$

| éléments | Coéf | V(t) | H(t) | Z(m) | M/0(t/m) |
|---------------------|-------|--------|-------|------|----------|
| Réaction de tablier | 1,036 | 626,94 | / | 0 | 0 |
| Surcharge Mc120 | 0,2 | 23,72 | / | 0 | 0 |
| Chevêtre | 1,036 | 79,31 | / | 0 | 0 |
| Fut | 1,036 | 10,75 | / | 0 | 0 |
| Effort sismique | 1 | / | 84,82 | 6,12 | 519,10 |
| Total | | 740,72 | 84,82 | | 519,10 |

Tableau 6.4. Efforts sollicitant de la pile à la combinaison accidentelle

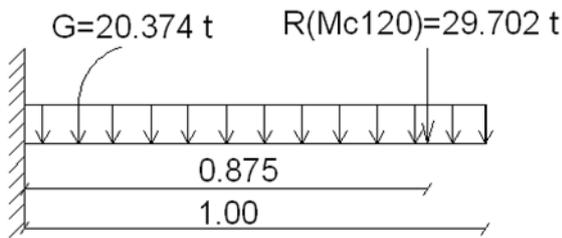
5. ETUDE DU CHEVETRE

Le rôle du chevêtre est d'assurer le transfert des descentes des charges et éventuellement des efforts horizontaux transmis par le tablier, il permet également l'emplacement des vérins lors du chargement des appareils d'appuis.

Le chevêtre sera calculé comme une poutre continue sur trois appuis qui sont les futs.

$H=1,75 \text{ m}$; $B=1,75 \text{ m}$; $L=10 \text{ m}$

$G.\text{corniche}+G.\text{corp} = 20,374 \text{ t}$; $R (Mc120) = 29,702 \text{ t}$ (réaction la plus défavorable)



– **combinaison d'action :**

E.L.U : 1.35 G + 1.35 Mc120

E.L.S : G + Mc120

On a modélisé le chevêtre par le logiciel SAP2000 qui donne les résultats suivants :

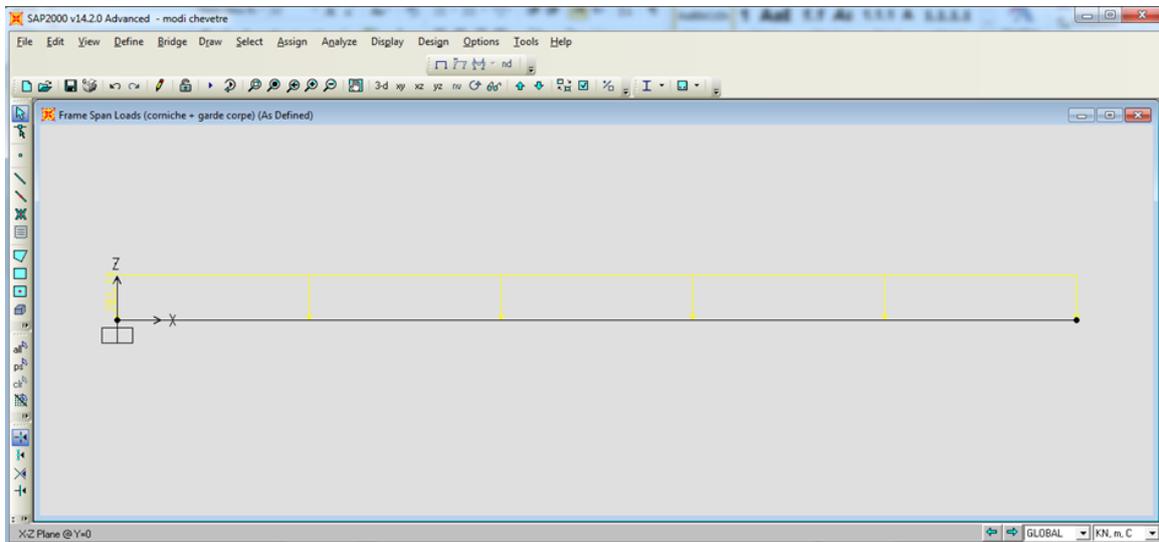


Figure 6.2. Modélisation du chevêtre

| | Moment (t.m) | Effort tranchant (t) |
|------------|--------------|----------------------|
| ELU | 48,838 | 67,6 |
| ELS | 36,17 | 50,076 |

Tableau 6.5. Moments et efforts tranchants du chevêtre

5.1. Calcul du ferrailage

a) ELU

$M_u = 48,838 \times 10^{-2} \text{ MN.m}$; $d = 0,9h = 1,57 \text{ m}$; $f_{c28} = 35 \text{ Mpa}$; $\gamma_b = 1,5$; $\gamma_s = 1,15$; $d' = 0,1h = 0,175 \text{ m}$

$\mu_r = 0,392$

$$f_{bc} = \frac{0,85 \times f_{c28}}{\gamma_b} = 19,83 \text{ Mpa}$$

$$\mu_u = \frac{M_u}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \frac{48,838 \times 10^{-2}}{1,75 \times (1,57)^2 \times 19,83} = 5,70 \times 10^{-3} < 0,392 \longrightarrow \text{section simple armature}$$

$$\alpha = 1,25 \left(1 - \sqrt{1 - 2\mu} \right) = 1,25 \left(1 - \sqrt{1 - (2 \times 5,70 \times 10^{-3})} \right) = 7,145 \times 10^{-3}$$

$$z = d(1 - 0,4\alpha) = 1,57(1 - 0,4 \times 7,145 \times 10^{-3}) = 1,565 \text{ m}$$

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 347,82 \text{ Mpa}$$

$$A_{st} = \frac{M_u}{z \times \sigma_s} = \frac{48,838 \times 10^{-2}}{1,565 \times 347,82} = 8,97 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 8,97 \text{ cm}^2$$

On a trouvé une section très faible donc on prévoit un ferrailage minimal donné par le R.P.O.A(8). Le pourcentage minimum donné par le R.P.O.A est de 0.5% de la section :

$$A_{min} = 0,5/100 \times (1,75 \times 1,75) = 153,125 \text{ cm}^2$$

Donc on adopte un ferrailage de :

$$26T25 = 127,66 \text{ cm}^2 \quad \text{en appui}$$

$$13T20 = 40,84 \text{ cm}^2 \quad \text{en travée}$$

b) ELS

$$M_s = 36,17 \times 10^{-2} \text{ MN.m}$$

Il faut vérifier ces deux conditions : $-\sigma_{bc} < \bar{\sigma}_{bc}$

$$-\sigma_{st} < \bar{\sigma}_{st}$$

– Détermination de l'axe neutre (x) :

$$\frac{bx^2}{2} + n \times A_{sc}(x - d') - n \times A_{st} \times (d - x) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

n : coefficient d'équivalence = 15

$$(1) \Rightarrow 0,875x^2 + 15 \times 127,66 \times 10^{-4}(x - 0,175) - 15 \times 40,84 \times 10^{-4} \times (1,57 - x) = 0$$

$$\Rightarrow \sqrt{\Delta} = 0,69$$

$$\Rightarrow x = 0,28 \text{ m}$$

– Détermination des contraintes :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_s \times x}{I}$$

$$I = I_{bc} + n \times I_{sc} + n \times I_{st}$$

$$I_{bc} = \frac{bx^3}{3} = 0,012 \text{ m}^4$$

$$I_{sc} = A_{sc}(x - d') = 1,40 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_{st} = A_{st}(d - x) = 6,79 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$I = 0,010 + 15 \times 1,40 \times 10^{-4} + 15 \times 6,79 \times 10^{-3} = 0,115 \text{ m}^4$$

$$\sigma_{bc} = \frac{36,17 \times 10^{-2} \times 0,28}{0,115}$$

$$\sigma_{bc} = 0,88 \text{ Mpa}$$

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ Mpa}$$

$-\sigma_{bc} < \bar{\sigma}_{bc} \Rightarrow$ condition vérifiée

$$\sigma_{st} = n \times \frac{M_s \times (d-x)}{I}$$

$$\sigma_{st} = 15 \times \frac{36,17 \times 10^{-2} \times (1,57 - 0,28)}{0,115}$$

$$\sigma_{st} = 60,86 \text{ Mpa}$$

$$\bar{\sigma}_{st} = \min\left(\frac{2}{3} f_e; \max(0,5 f_e, 110 \sqrt{\eta f_{t28}})\right)$$

$$f_{t28} = 0,6 + 0,06 f_{c28} = 2,7$$

$$\bar{\sigma}_{st} = \min(266,66 ; 228,63) = 228,63$$

$-\sigma_{st} < \bar{\sigma}_{st} \Rightarrow$ condition non vérifiée

- Condition de non fragilité

$$A_{\min} \geq 0,23 \times b \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0,23 \times 1,75 \times 1,57 \times \frac{2,7}{400} = 42,65 \text{ cm}^2 \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

c) Effort tranchant

$$T_u = 67,6 \times 10^{-2} \text{ MN}$$

$$\tau_u = \frac{T_u}{b \times d}$$

$$\tau_u = \frac{67,6 \times 10^{-2}}{1,75 \times 1,57} = 0,246 \text{ Mpa}$$

$$\tau_{adm} = \min\left(0,15 \frac{f_{c28}}{\gamma_b}; 4 \text{ MPa}\right)$$

$$\tau_{adm} = 3,5 \text{ Mpa}$$

$\tau_u < \tau_{adm} \Rightarrow$ condition vérifiée

Le diamètre minimum des armatures transversales est donnée par :

$$\Phi \leq \min\left(\frac{h}{35}; \frac{b}{10}; \varphi\right) = \min\left(\frac{175}{35}; \frac{175}{10}; 2,5\right) = 2,5 \text{ cm.}$$

On prend $\Phi = 14 \text{ mm.}$

Espacement d'après R.P.A :

- Zone nodale : $\text{esp} \leq \min\left(\frac{h}{4}; 12\varphi_L; 30 \text{ cm}\right) \Rightarrow \text{esp} = 20 \text{ cm.}$

- Zone courante : $\text{esp} \leq \frac{h}{2} \Rightarrow \text{esp} = 30 \text{ cm.}$

6. ETUDE DE LA PILE

6.1. Etude du flambement

$$\lambda = \frac{l_f}{i}$$

Avec :

l_f : longueur de flambement

i : rayon de giration

$$l_f = \frac{\sqrt{2}}{2} h \text{ pile} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 6,12 = 4,32 \text{ m}$$

$$i = \frac{a}{2\sqrt{3}} = \frac{1,1}{2\sqrt{3}} = 0,137$$

Donc $\lambda = \frac{l_f}{i} = \frac{4,32}{0,137} = 31,53 < 50 \Rightarrow$ il n'y a pas de risque de flambement

Avec $B=0,95 \text{ m}^2$

6.2. Ferrailage de la pile

On prévoit un ferrailage minimal donné par le R.P.O.A(8).

– Armatures longitudinales

$$0,5\% < p_g < 3\%$$

$$A_{min} = 0,9\% B = 0,9 \times 0,95 = 85,5 \text{ cm}^2$$

On adopte un ferrailage de $18\text{HA}25 = 98,17 \text{ cm}^2$ avec un espacement de $e = 20 \text{ cm}$

– Armatures transversales

$$A_t \geq \frac{A_l}{16} \times \frac{f_{el}}{f_{et}} \times \frac{S_t}{100}$$

Avec:

A_t : La section des aciers transversaux

A_l : La section totale des armatures longitudinales

f_{el} : Caractéristiques de l'acier des armatures longitudinales

f_{et} : Caractéristiques de l'acier des armatures transversales

S_t : L'espacement des armatures transversales

$$S_t = \min [24\phi_t ; 8\phi_l ; 0,25d] = 200 \text{ mm}$$

$$A_t \geq \frac{98,17}{16} \times \frac{400}{235} \times \frac{200}{100}$$

$A_t \geq 20,88$ donc on prend T14

– Espacement d'après le R.P.O.A

Zone critique : \Rightarrow esp = 15 cm.

Zone courante : \Rightarrow esp = 20 cm.

7. ETUDE ET FERRAILLAGE DE LA SEMELLE DE LIAISON

7.1. Pré dimensionnement

Les dimensions de la semelle sont :

A=6,00 m

B=13,20 m

H=1,50 m

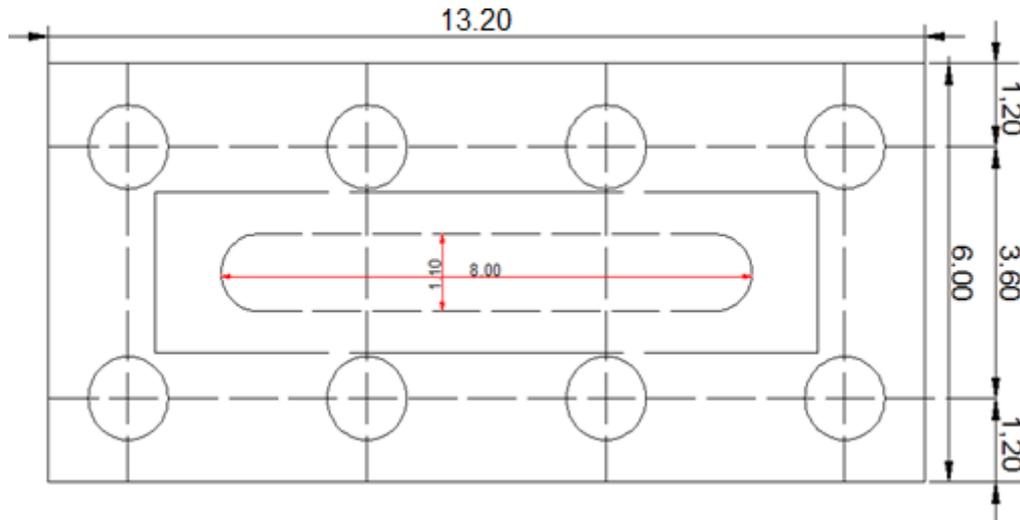


Figure 6.3. Dessin de la coupe de la semelle

7.2. Vérification de la stabilité et des contraintes sous semelle

Combinaison fondamentale : $ELU=1,35G+1,5Q+1,35Mc120+0,8Qvl$

| Eléments | Coéf | V(t) | H(t) | Z(m) | M/0(t/m) |
|---------------------|------|----------|-------|------|----------|
| Réaction de tablier | 1,35 | 816,96 | / | 0 | 0 |
| Surcharge Mc120 | 1,35 | 160,11 | / | 0 | 0 |
| Chevêtre | 1,35 | 102,006 | / | 0 | 0 |
| Fut | 1,35 | 14,013 | / | 0 | 0 |
| Variation linéaire | 0,8 | / | 13,92 | 6,12 | 85,19 |
| Total | | 1093,089 | 13,92 | | 85,19 |

Tableau 6.6. Efforts sollicitant sous semelle à l'ELU

La stabilité de l'ensemble est assurée par l'intermédiaire des fondations.

Etude des piles

Combinaison fondamentale : ELS=G+Q+Mc120+0,6Qv1

| Eléments | Coéf | V(t) | H(t) | Z(m) | M/0(t/m) |
|---------------------|------|---------|-------|------|----------|
| Réaction de tablier | 1 | 605,158 | / | 0 | 0 |
| Surcharge Mc120 | 1 | 118,60 | / | 0 | 0 |
| Chevêtre | 1 | 76,56 | / | 0 | 0 |
| Fut | 1 | 10,38 | / | 0 | 0 |
| Variation linéaire | 0,6 | / | 10,44 | 6,12 | 63,92 |
| Total | | 810,698 | 10,44 | | 63,92 |

Tableau 6.7. Efforts sollicitant sous semelle à l'ELS

La stabilité de l'ensemble est assurée par l'intermédiaire des fondations.

Combinaison accidentelle : ELUacc=1,036G+Q+0,2Mc120+Fh sismique

| éléments | Coéf | V(t) | H(t) | Z(m) | M/0(t/m) |
|---------------------|-------|--------|-------|------|----------|
| Réaction de tablier | 1,036 | 626,94 | / | 0 | 0 |
| Surcharge Mc120 | 0,2 | 23,72 | / | 0 | 0 |
| Chevêtre | 1,036 | 79,31 | / | 0 | 0 |
| Fut | 1,036 | 10,75 | / | 0 | 0 |
| Effort sismique | 1 | / | 84,82 | 6,12 | 519,10 |
| Total | | 740,72 | 84,82 | | 519,10 |

Tableau 6.8. Efforts sollicitant sous semelle à la combinaison accidentelle

La stabilité de l'ensemble est assurée par l'intermédiaire des fondations.

7.3. Réactions des pieux de la pile

On applique la méthode des bielles, tel que cette méthode n'est valable que si ces deux conditions suivantes seront vérifiées :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \geq 45^\circ \\ h \geq \frac{L}{2} - \frac{a}{4} \end{array} \right.$$

Dans notre cas, les deux conditions sont vérifiées.

a) Combinaison fondamentale

– ELU

$$M_u = 85,82 \text{ t.m}$$

$$N_u = 1645,58 \text{ t}$$

$$\text{Soit la section d'un pieu : } S = \pi \times r^2 = 1,1309 \text{ m}^2$$

$$\text{On a deux files de quatre pieux donc : } B = 8S$$

$$\text{Le moment d'inertie est le suivant : } I = 2 \times 4 \times S \times V^2 = 29,31 \times S \text{ m}^4$$

$$V = 1,8 \text{ m}$$

On a:

$$\sigma = \frac{N_u}{B} \pm \frac{M_u \times V}{I}$$

$$R = \sigma \times S$$

D'où:

$$R_1 = \frac{1654,58}{8} + \frac{85,82 \times 1,8}{29,31} = 212,09 \text{ t}$$

$$R_2 = \frac{1654,58}{8} - \frac{85,82 \times 1,8}{29,31} = 201,55 \text{ t}$$

– ELS

$$M_s = 63,96 \text{ t.m}$$

$$N_s = 1218,95 \text{ t}$$

On a:

$$\sigma = \frac{N_s}{B} \pm \frac{M_s \times V}{I}$$

$$R = \sigma \times S$$

D'où:

$$R_1 = \frac{1218,95}{8} + \frac{63,96 \times 1,8}{29,31} = 156,29 \text{ t}$$

$$R_2 = \frac{1218,95}{8} - \frac{63,96 \times 1,8}{29,31} = 148,44 \text{ t}$$

a) Combinaison accidentelle

$$M_{u \text{ acc}} = 519,10 \text{ tm}$$

$$N_{u \text{ acc}} = 1163,73 \text{ t}$$

On a:

$$\sigma = \frac{N_{u \text{ acc}}}{B} \pm \frac{M_{u \text{ acc}} \times V}{I}$$

$$R = \sigma \times S$$

D'où:

$$R_1 = \frac{1163,73}{8} + \frac{519,10 \times 1,8}{29,31} = 177,34 \text{ t}$$

$$R_2 = \frac{1163,73}{8} - \frac{519,10 \times 1,8}{29,31} = 113,58 \text{ t}$$

7.4. Estimation de la charge nominale

La charge nominale est la charge admissible vis-à-vis de la résistance du sol. Pour les besoins de l'estimation de la charge nominale de ces pieux nous allons référer à la méthodologie exposée par J-Costet et Sanglerat(4).

– Méthode Sanglerat

$$Q_n = \frac{A}{3} Q_p + \frac{Q_f}{2}$$

Avec :

A : aire de la section droit du pieu.

$\varphi = 29,9^\circ$; C = 3,1 Kpa ; D = 21 m ; (Nc = 30,14 ; Nq = 18,4 ; N γ = 18,1) ; $\gamma = 2 \text{ t/m}^3$;

K $\rho\gamma = 1,5$; $\delta = \frac{2}{3} \varphi = 19,93^\circ$

Q $_f$: frottement latéral mobilisable le long du fut à la rupture :

$$Q_f = (K\rho\gamma \sin\delta) \gamma \frac{D^2}{2} p$$

Avec :

P : périmètre du pieu.

D : longueur du pieu.

K $\rho\gamma$: coefficient de butée.

δ : Obliquité de la butée par rapport au pieu.

γ : densité du milieu considéré.

$$Q_f = (1,5 \sin 19,93) \times 2 \times \frac{21^2}{2} \times 3,768 = 849,633 \text{ t}$$

Q $_p$: résistance de pointe à la rupture :

$$Q_p = \gamma D N_q + 1,2 c N_c$$

$$K_a = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) = 0,334$$

$$K_p = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) = 2,98$$

$$Q_p = 2 \times 21 \times 18,4 + 1,2 \times 0,31 \times 30,14 = 784,012 \text{ t}$$

$$Q_n = \frac{\pi(1,2)^2}{3 \times 4} \times 784,012 + \frac{849,633}{2} = 720,382 \text{ t}$$

$$\text{– ELU : } \frac{Q_f + Q_p}{1,4} = \frac{849,633 + 784,012}{1,4} = 1166,97 \text{ t}$$

$$\text{– ELS : } \frac{Q_f}{2} + \frac{Q_p}{3} = \frac{849,633}{2} + \frac{784,012}{3} = 686,15 \text{ t}$$

$$- \text{ELU acc} : \frac{Qf+Qp}{1,3} = \frac{849,633+784,012}{1,3} = 1256,65 \text{ t}$$

| | Pile | | $\phi=29,9^\circ$ D=21m |
|---------------|--------|--------|----------------------------|
| | R1 | R2 | |
| ELU | 212,09 | 201,55 | 1166,97 |
| ELUacc | 177,34 | 113,58 | 1256,65 |
| ELS | 156,29 | 148,44 | 686,15 |

Tableau 6.9. Réactions des pieux sous les différentes combinaisons

7.5. Ferrailage de la semelle de liaison

Efforts obtenus :

$$N1=156,29 \text{ t}$$

$$N2=148,44 \text{ t}$$

$$T1= (2,075/1,45) \times 156,29 = 223,65 \text{ t}$$

$$T2= (2,075/1,45) \times 148,44 = 212,42 \text{ t}$$

a) Armatures longitudinales

$$A_{l_{inf}} = (223,65 \times 10^{-2} / 201,63) = 110,92 \text{ cm}^2, \text{ on prend } 25\text{HA}25 = 122,75 \text{ cm}^2 \text{ avec esp } 15 \text{ cm}$$

– Armature constructive :

On prend HA20 esp 15 cm

b) Armatures transversales

$$A_{t_{inf}} = 1/4 \times A_{l_{inf}} = 122,75/4 = 30,68 \text{ cm}^2, \text{ on prend } 17\text{T}16 = 34,18 \text{ cm}^2 \text{ avec esp } 20 \text{ cm}$$

– Armature constructive :

On prend HA16 esp 20cm

7.6. Ferrailage des pieux de la pile

$$N1 = 159,63 \text{ t} \quad ; \quad N2 = 141,90 \text{ t} \quad ; \quad M = 0,4793 \text{ t.m}$$

Ces efforts donnent un ferrailage minimum de :

$$0,8\% \times (A.\text{pieu}) \text{ (puisque'il s'agit d'une zone sismique)} = 90,47 \text{ cm}^2$$

$$\text{Nous aboutirons sur une section de } 19 \text{ HA } 25 = 92,27 \text{ cm}^2$$

1. INTRODUCTION

Les culées sont les appuis extrêmes ; destinée à supporter le poids du tablier. Elles sont constituées en générale :

- D'un mur de front sur lequel s'appuie le tablier, ce mur a aussi pour rôle de soutenir les terres.
- Murs latéraux, ils sont appelés "murs en retour" s'ils sont parallèles à l'axe de l'ouvrage ou "murs en ailes" s'ils sont inclinés à cet axe. Ils assurent le soutènement des terres des remblais d'accès au pont.
- Mur garde grève, il se trouve à l'arrière, son rôle est d'isoler le tablier du remblai.
- Il est prévu derrière la culée des dalles de transition en béton armée pour lutter contre le tassement éventuel des remblais.

2. CHOIX DU TYPE DE CULEE

Notre choix s'est porté sur les culées remblayées ; Il faut prévoir une culée qui maintient les terres de remblai, cette culée remblayée va jouer le double rôle de soutènement des terres.

3. IMPLANTATION DES CULEES

La hauteur de la culée sera évaluée par la formule suivante:

$$H_{\text{culée}} = \text{côte}_{\text{projet}} - \text{côte}_{\text{fondation}}$$

L'ensemble des côtes définissant la position des culées est mentionnée dans le tableau suivant :

| Désignation | Culée1 | Culée2 |
|--------------------------|------------|---------|
| Point kilométrique | 109+388,05 | 109+709 |
| Côte projet (m) | 978,242 | 977,50 |
| Côte TN (m) | 975,83 | 974,24 |
| Côte de la fondation (m) | 973,672 | 971,30 |
| Hauteur de la culée (m) | 4,57 | 6,20 |

Tableau 7.1. La position des culées

4. PRE DIMENSIONNEMENT DES CULEES

D'après les données relatives à la portée (les côtes du terrain naturel), on trouve que la hauteur de notre culée est :

Pour la culée N° 1 $H_{\text{culée 1}} = 4,57 \text{ m}$

Pour la culée N° 2 $H_{\text{culée 2}} = 6,20 \text{ m}$

4.1. Mur de front (M.F)

Son épaisseur en tête est imposée par la nécessité de loger les appareils d'appui, et l'about de la poutre.

$e = e_1 + e_2 + e_3 + e_4$ avec :

e_1 : distance d'entraxes de l'appareil d'appui et le bord ($e_1 = 35\text{cm}$).

e_2 : about de la poutre ($e_2 = 50\text{cm}$)

e_3 : épaisseur de joint de dilatation ($e_3 = 9\text{cm}$)

e_4 : épaisseur de mur garde grève ($e_4 = 25\text{cm}$)

$e = 1,10 \text{ m}$

$h = 2,60\text{m}$; $e_{mf} = 1,10 \text{ m}$; $L=10,00\text{m}$

4.2. Mur garde grève (M.G.G)

Le mur garde grève a pour fonction de séparer physiquement le remblai de l'ouvrage, il doit résister aux efforts de poussée des terres, aux efforts de freinage dus à la charge d'exploitation et aux efforts transmis par la dalle de transition.

Hauteur :

$h = \text{hauteur de la poutre} + \text{hauteur de l'appareil d'appui} + \text{dé d'appui} + \text{hauteur de la dalle}$

$h = 1,50 + 0,085 + 0,2 + 0,25 = 2,035 \text{ m}$

Epaisseur : $e = \text{Max} (0,30\text{m} ; \frac{h}{8}) = 0,25 \text{ m}$

Longueur : $L = 10,00 \text{ m}$

4.3. Dalle De Transition (D.T)

Sa longueur est dimensionnée par la formule suivante :

$L = \text{Min}[6 \text{ m}; \text{Max} (4\text{m}, ; 0,6H)]$

Avec :

H étant la hauteur de remblai (mur de front+ mur garde grève) = 4,7 m

On prend : $L = 4 \text{ m}$

Généralement elle a une épaisseur e :

$e = 30 \text{ cm}$

Largeur de la dalle = 10,00 m

4.4. Mur en retour (M.R)

Les murs en retour sont des voiles encastés d'un côté sur le mur de front et l'autre côté sur la semelle de fondation.

Ils ont pour rôle d'assurer le soutènement des terres de remblai d'accès au pont.

Les dimensions du mur de front sont limitées comme suit :

La pente : $p=2/3$

$L_r = 5,00$ m

Epaisseur : $e=0,65$ m

4.5. Semelle

On prend $e_s = 1,5$ m

Longueur de la semelle : $L = 13,20$ m

Largeur de la semelle : $l = 6,00$ m

4.6. Le corbeau

Pour fermer le vide entre tablier et le mur garde grève, ces éléments sont munis de corbeau en partie supérieure dans lesquels se trouvent les réservations pour l'installation des joints.

Hauteur : $H = 1,25$ m

Hauteur : $a = 0,5$ m

Epaisseur : $e_c = 0,4$ m

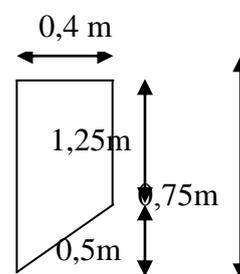


Figure 7.1. Pré dimensionnement du corbeau

4.7. Le sommier d'appui

Le sommier d'appui est l'élément sur lequel repose l'about du tablier, dans notre cas on a une culée remblayée donc le sommier d'appui est intégré au mur de front.

D'après le guide S.E.T.R.A on prend $d' = 0,5$ m

Soit a : la longueur de l'appareil d'appui $\Rightarrow a = 30$ cm

Il faut prendre $(d'' - \frac{a}{2}) > 0,2$ m on prend $d'' = 0,50$ m

Donc l'épaisseur du sommier d'appui sera :

$e = a + d' + d'' + \text{épaisseur du mur garde grève}$

$e = 1,55$ m

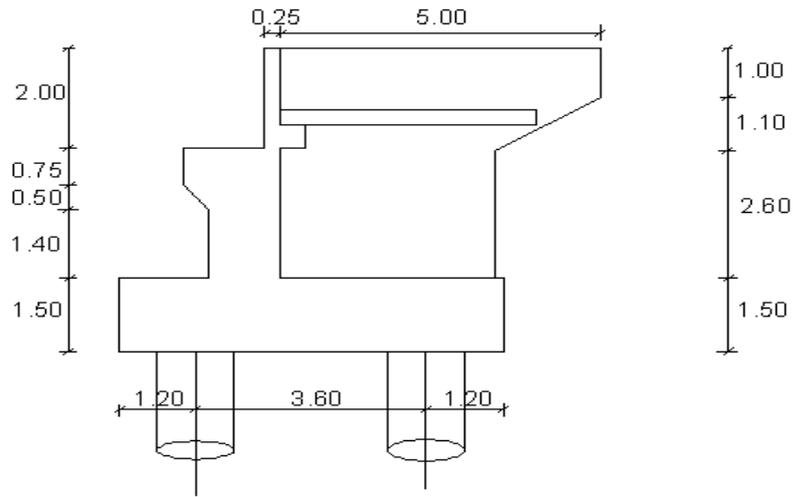


Figure 7.2. Dessin de la culée 1

5. FERRAILLAGE DU MUR GARDE GREVE

5.1. Cas fondamental

Le mur garde grève est calculée comme une console encastrée dans le chevêtre, il est soumis aux surcharges du remblai et à la poussée des terres.

- Détermination des sollicitations et du ferrailage

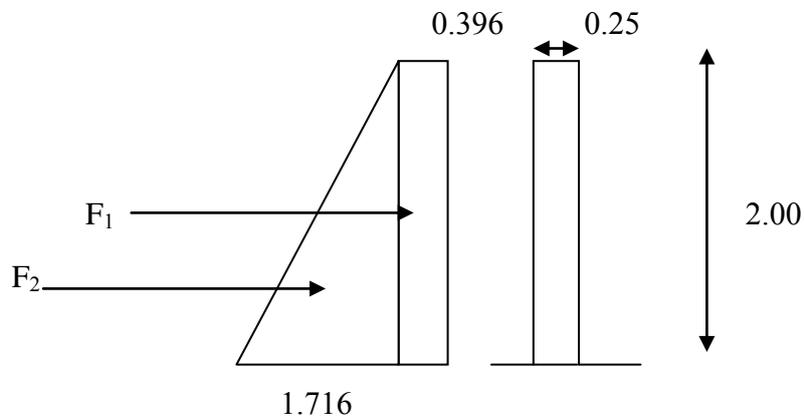


Figure 7.3. Sollicitations du mur garde grève

$$\sigma(h) = K_a \times \gamma_t \times h + K_a \times q$$

Avec :

$$K_a = 0,33 \quad ; \quad \gamma_t = 2 \text{ t/m}$$

q : surcharge de remblai majorée de 20% = 1,2 t/m².

$$\text{Si } h=0\text{m} \Rightarrow \sigma(0)_1 = 0,33 \times 1,2 = 0,396 \text{ t/m}^2$$

$$\Rightarrow F_1 = \sigma(h)_1 \times h = 0,396 \times 2,00 = 0,792 \text{ t}$$

$$\text{Si } h=2,00\text{m} \Rightarrow \sigma(2,00)_2 = 0,33 \times 2 \times 2 + 0,396 = 1,716 \text{ t/m}^2$$

$$\Rightarrow F_2 = (\sigma(h)_2 - \sigma(h)_1) / 2 \times h = (1,716 - 0,396) / 2 \times 2,00 = 1,32 \text{ t/m}^2$$

| Z(m) | $\sigma_v(\text{t/m}^2)$ | K_a | $\sigma_h(\text{t/m}^2)$ | Force(t) | Pt d'application/ O(m) |
|------|--------------------------|-------|--------------------------|----------|------------------------|
| 0 | 1,2 | 0,33 | 0,396 | 0,792 | 1,00 |
| 2,00 | 5,2 | 0,33 | 1,716 | 1,32 | 0,66 |

Tableau 7.2. Sollicitations dans le mur garde grève

Le moment d'encastrement est donné par la formule suivante :

$$M = F_1 x_1 + F_2 x_2$$

$$M = 0,792 \times 1 + 1,32 \times 0,66 = 1,663 \text{ t.m} = 16,63 \times 10^{-3} \text{ MN}$$

$$\mu_u = \frac{M_u}{b \times f_{bc} \times d^2}$$

Avec :

$$f_{bc} = \frac{0,85 \times f_{cj}}{\gamma_b} = \frac{0,85 \times 35}{1,5} = 19,83 \text{ Mpa}$$

$$\mu_u = \frac{16,63 \times 10^{-3}}{1 \times 19,83 \times 1,8^2} = 2,58 \times 10^{-4}$$

$$\mu_u = 2,58 \times 10^{-4} < \mu_r = 0,392 \longrightarrow \text{Section simple armature}$$

$$A_{st} = \frac{M_u}{Z \times \sigma_{st}}$$

$$\alpha = 1,25 \left(1 - \sqrt{1 - 2\mu} \right) = 3,22 \times 10^{-4}$$

$$z = d(1 - 0,4\alpha) = 1,79 \text{ m}$$

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 347,82 \text{ Mpa}$$

$$A_{st} = \frac{16,63 \times 10^{-3}}{1,79 \times 347,82} = 0,267 \text{ cm}^2$$

5.2. Cas accidentel

- **La poussée dynamique des terres**

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \gamma \times (1 \pm k_v) \times H^2 \times K_{ad}$$

$k_H = A = 0,12$ (coefficient d'accélération de zone groupe 2 (pont important)).

$$k_v = 0,3 k_H = 0,036$$

Dans les conditions sismiques le coefficient de poussée sera déterminé par la formule de MONOBE- OKABE

Avec:

$$K_{ad} = \frac{\cos^2(\varphi - \theta)}{\cos^2 \theta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin \varphi \sin(\varphi - \beta - \theta)}{\cos \theta \cos \beta}} \right]^2} = \frac{\cos^2(23,40)}{\cos^2(7,095) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(30) \sin(23,40)}{\cos(6,60) \cos(0)}} \right]^2}$$

$$\Rightarrow K_{ad}=0,408$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{k_h}{1 \pm k_v} \right) = \arctan \left(\frac{0,12}{1 \pm 0,036} \right) = 6,60^\circ$$

H : La hauteur du mur (H = 2 m)

γ : Le poids volumique des terres ($\gamma = 2 \text{ t/m}^3$)

φ : L'angle de frottement interne du remblai sans cohésion ($\varphi = 30^\circ$)

β : Angle de la surface du remblai sur l'horizontal. ($\beta = 0$)

Donc :

$$\Rightarrow F_{ad}=1,69 \text{ t}$$

- **La poussée due à la surcharge**

$$F_{ad}(q) = \frac{q \times H}{\cos \beta} (1 \pm k_v) \times K_{ad}$$

$$\Rightarrow F_{ad}(q) = 1,014 \text{ t}$$

$$M_u = (F_{ad} + F_{ad}(q)) \times H/2 = (1,69 + 1,014) \times 2/2$$

$$\Rightarrow M_u = 2,704 \text{ t.m}$$

$$\mu_u = \frac{M_u}{b \times f_{bc} \times d^2} = 4,20 \times 10^{-4}$$

$$4,20 \times 10^{-4} < \mu_r = 0,392 \longrightarrow \text{Section simple armature}$$

$$A_{st} = \frac{M_u}{Z \times \sigma_{st}}$$

$$\alpha = 1,25 \left(1 - \sqrt{1 - 2\mu} \right) = 5,25 \times 10^{-4}$$

$$z = d(1 - 0,4\alpha) = 1,79 \text{ m}$$

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 347,82 \text{ Mpa}$$

$$A_{st} = \frac{27,04 \times 10^{-3}}{1,79 \times 347,82} = 0,434 \text{ cm}^2$$

5.3. Ferrailage minimum d'après le R.P.O.A

$$A_{min} = 0,5\% B \Rightarrow A_{min} = 0,5\% (0,25 \times 1) = 12,5 \text{ cm}^2$$

On compare :

$$A_{st} = 0,434 \text{ cm}^2 < A_{min(R.P.O.A)} = 12,5 \text{ cm}^2$$

Donc on ferraille avec le minimum de R.P.O.A.

On adoptera alors :

6HA16 ; $A_{st} = 12,06 \text{ cm}^2 \Rightarrow$ partie tendue avec un espacement de 15cm

6HA12 ; $A_{st} = 6,79 \text{ cm}^2 \Rightarrow$ partie comprimée avec un espacement de 20cm.

5.4. Armatures de répartition

$$A_r = 25\% \times A_{st} \Rightarrow A_r = 0,25 \times 12,5 = 3,125 \text{ cm}^2.$$

On adopte :

5HA12/ml $\Rightarrow A_r = 5,65 \text{ cm}^2$; partie tendue avec un espacement de 20cm.

6. LA DALLE DE TRANSITION

La dalle de transition consiste à jeter un pont entre le tablier et la culée. Elle est calculée comme une poutre reposant d'un coté sur le corbeau et de l'autre coté sur le remblai compacté.

6.1. Evaluation des charges

- Poids propre de la dalle : $0,3 \times 1 \times 2,5 = 0,75 \text{ KN/ml}$
- Poids propre des terres : $1 \times 2 \times 1,03 = 2,06 \text{ KN/ml}$
- Surcharge remblai : $1 \times 1,2 = 1,2 \text{ KN/ml}$
- Revêtement de la chaussée : $0,085 \times 1 \times 2,2 = 0,187 \text{ KN/ml}$

$$\Sigma q = 4,197 \text{ KN/ml}$$

6.2. Ferrailage de la dalle de transition

- **ELU**

$$q_u = 1,35G + 1,5Q = 1,35 \times (0,75 + 2,06 + 0,187) + 1,5 \times 1,2$$

$$q_u = 5,84 \text{ t/ml}$$

$$M_u = \frac{q_s \times L^2}{8} = \frac{5,84 \times 4^2}{8} = 11,68 \text{ t.m}$$

$$\mu_u = \frac{M_u}{b \times f_{bc} \times d^2} = \frac{116,8 \times 10^{-3}}{1 \times 19,83 \times 0,27^2} = 0,080$$

$$0,080 < \mu_r = 0,392 \quad \longrightarrow \quad \text{Section simple armature}$$

$$A_{st} = \frac{M_u}{Z \times \sigma_{st}}$$

$$\alpha = 1,25 \left(1 - \sqrt{1 - 2\mu} \right) = 0,104$$

$$z = d(1 - 0,4\alpha) = 0,258 \text{ m}$$

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 347,82 \text{ Mpa}$$

$$A_{st} = \frac{116,8 \times 10^{-3}}{0,258 \times 347,82} = 13,01 \text{ cm}^2$$

On prend 7T20 = 21,99 cm² avec esp = 15 cm

- **ELS**

$$q_s = G + Q = 0,75 + 2,06 + 0,187 + 1,2 = 4,197 \text{ t/ml}$$

$$M_s = \frac{q_s \times L^2}{8} = \frac{41,97 \times 10^{-3} \times 4^2}{8} = 0,0839 \text{ MN}$$

Il faut vérifier ces deux conditions : $-\sigma_{bc} < \bar{\sigma}_{bc}$

$$-\sigma_{st} < \bar{\sigma}_{st}$$

- Détermination de l'axe neutre (x) :

$$\frac{bx^2}{2} + n \times A_{sc} (x-d') - n \times A_{st} (d-x) = 0 \dots \dots \dots (1)$$

$$(1) \Rightarrow 0,5x^2 + 15 \times 21,99 \times 10^{-4} x - 89,059 \times 10^{-4} = 0$$

$$\Rightarrow x = 0,085 \text{ m}$$

- Détermination des contraintes :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_s \times x}{I}$$

$$I = \frac{b \times x^3}{3} + n \times A_{st} (d-x)^2$$

$$I = \frac{1 \times 0,085^3}{3} + 15 \times 21,99 \times 10^{-4} (0,27 - 0,085)^2$$

$$I = 8,765 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$\sigma_{bc} = \frac{0,0839 \times 0,085}{8,765 \times 10^{-4}} = 8,13 \text{ Mpa}$$

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ Mpa}$$

$\sigma_{bc} < \bar{\sigma}_{bc} \Rightarrow$ condition vérifiée

$$\sigma_{st} = n \times \frac{M_s \times (d-x)}{I}$$

$$\sigma_{st} = 15 \times \frac{0,0839 \times (0,27 - 0,085)}{8,765 \times 10^{-4}}$$

$$\sigma_{st} = 265,62 \text{ Mpa}$$

$$\bar{\sigma}_{st} = \min\left(\frac{2}{3} f_e; \max(0,5 f_e, 110 \sqrt{\eta f_{t28}})\right)$$

$$f_{t28} = 0,6 + 0,06 f_{c28} = 2,7$$

$$\bar{\sigma}_{st} = \min(266,66 ; 228,63) = 228,63$$

$\sigma_{st} < \bar{\sigma}_{st} \Rightarrow$ condition non vérifiée

On augmente la section d'armature on adopte $A_{st} = 25,13 \text{ cm}^2$ (8T20)

$$\sigma_{bc} = 6,49 < \bar{\sigma}_{bc} = 21 \text{ Mpa} \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

$$\sigma_{st} = 143,90 < \bar{\sigma}_{st} = 228,63 \text{ Mpa} \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

– **Armatures de répartition**

$$A_r = \frac{A_{st}}{4} = 3,27 \text{ cm}^2$$

On prend 5T12 = 5,65 cm²

– **Vérification de la condition de non fragilité**

$$V_u = \frac{q_u \times l}{2} = \frac{5,84 \times 4}{2} = 11,68 \text{ t}$$

$$\tau_u = \frac{V_u}{d} \leq 0,07 \frac{f_{cj}}{\gamma_b}$$

$\tau_u = 43,26 \text{ t/m} < 163,33 \text{ t/m} \Rightarrow$ condition vérifiée

7. ETUDE DU CORBEAU

Il forme un appui à la dalle de transition encastré sur le mur de grève. On calcule le corbeau comme une console encastrée sur le mur garde grève.

7.1. Condition d'une console courte

Les dimensions du corbeau sont :

$$d \geq \max(a ; L)$$

$1,2 \geq 0,5 \Rightarrow$ condition vérifiée

7.2. Cisaillement

On va vérifier le cisaillement dans le corbeau.

$$\bar{\tau}_u = \min[4 ; 0,03(2 + \rho) \times \min(f_{c28} ; 30)]$$

Avec :

$$\rho = \min\left(\frac{l}{a} ; 4\right) = 2$$

$$\bar{\tau}_u = 360 \text{ t}$$

$$\tau_u = \frac{V_u}{b \times d}$$

$$\tau_u = \frac{11,68}{1 \times 1,38} = 8,46 \text{ t}$$

$\tau_u < \bar{\tau}_u \Rightarrow$ condition vérifiée

$$Z = \min[0,75 \times d \times (1 + \rho/10) ; 1,2 \times a (0,8 + \rho/5)]$$

$$Z = 0,72 \text{ m}$$

$$M_u = \frac{V_u \times L}{2} = \frac{11,68 \times 0,40}{2} = 2,33 \text{ t.m}$$

$$\text{Le ferrailage est : } A_s = \frac{2,33}{0,72 \times 34782,6} = 0,93 \text{ cm}^2$$

7.3. Ferrailage minimum d'après le R.P.O.A

$$A_{\min} = 0,5\% B \Rightarrow A_{\min} = 0,5\% \times (0,40 \times 1) = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 20 \text{ cm}^2$$

$$\text{On compare : } A_{st} = 2,51 \text{ cm}^2 < A_{\min(\text{R.P.O.A})} = 20 \text{ cm}^2$$

$$\text{On adoptera alors : } A_{\min(\text{R.P.O.A})} = 20 \text{ cm}^2$$

On choisit : $A_{st} = 28,27 \text{ cm}^2$ (9HA20) avec un espacement de 15 cm

7.4. Armatures de répartition

$$A_r = 25\% A_{st \min} \Rightarrow 25\% \times (28,27) = 7,06 \text{ cm}^2$$

On adopte : $A_{st} = 10,05 \text{ cm}^2$ (5HA16) avec espacement de 20 cm

8. ETUDE DU MUR EN RETOUR

Du point de vue mécanique, un mur en retour constitue un élément complexe puis qu'il s'agit d'une plaque encastrée sur une partie de son contour et soumise à un système de surcharge répartie à étudier séparément.

8.1. Dimensionnement

On propose un mur en retour avec la section suivante :

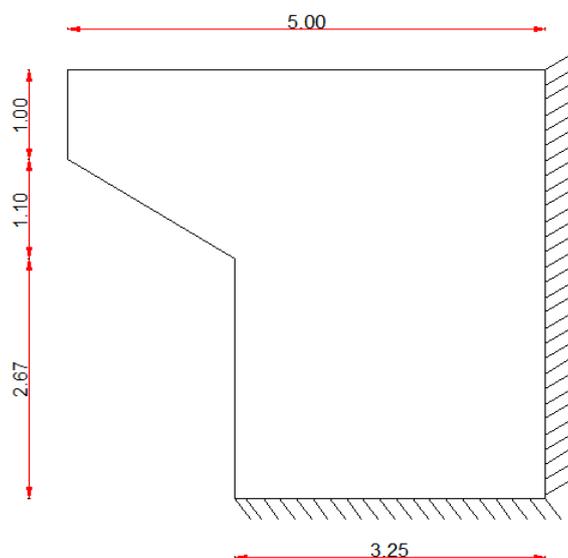


Figure 7.4. Dimensions du mur en retour

8.2. Détermination des contraintes

8.2.1. Cas accidentel

- La poussée dynamique des terres

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \gamma (1 \pm k_v) H^2 \times K_{ad}$$

$$k_H = A = 0,12$$

$$k_v = 0,3 \quad k_H = 0,036$$

Avec:

$$K_{ad} = \frac{\cos^2(\varphi - \theta)}{\cos^2\theta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin\varphi \sin(\varphi - \beta - \theta)}{\cos\theta \cos\beta}} \right]^2} = \frac{\cos^2(23.40)}{\cos^2(7.095) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(30) \sin(23.40)}{\cos(6.60) \cos(0)}} \right]^2}$$

$$K_{ad} = 0,408$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{k_h}{1 \pm k_v}\right) = \arctan\left(\frac{0.12}{1 \pm 0.036}\right) = 6.60^\circ$$

H : La hauteur du mur (H = 4,77m)

γ : Le poids volumique des terres ($\gamma = 2 \text{ t/m}^3$)

φ : L'angle de frottement interne du remblai sans cohésion ($\varphi = 35^\circ$)

β : Angle de la surface du remblai sur l'horizontal. ($\beta = 0$)

| Hauteur (m) | F _{ad} (t/m ²) |
|-------------|-------------------------------------|
| 4,77 | 9,617 |
| 2,1 | 1,864 |
| 1 | 0,422 |

Tableau 7.3. Calcul de la poussée dynamique des terres

- **La poussée due à la surcharge**

$$F_{ad}(q) = \frac{q H}{\cos \beta} (1 \pm k_v) K_{ad}$$

$$F_{ad}(q) = 2,419 \text{ t/m}^2$$

8.2.2. Cas fondamental

La surcharge du remblai supportant une chaussée $q = 1 \text{ t/m}^2$, majorée de 20% = 1,2t/m²

$$\sigma(h) = Ka \times \gamma t \times h + Ka \times q$$

$$Ka = 0,33 ; \gamma t = 2 \text{ t/m}^2$$

$$\text{E.L.U} : \sigma(h) = Ka \times (1,35\gamma t \times h + 1,5 \times q) = Pu$$

$$\text{E.L.S} : \sigma(h) = Ka \times \gamma t \times h + Ka \times q = Ps$$

| h(m) | σ(h) [t.m ²] | |
|------|--------------------------|-------|
| | E.L.U | E.L.S |
| 0 | 0,594 | 0,396 |
| 4,77 | 4,844 | 3,544 |

Tableau 7.4. Les contraintes sur le mur en retour

8.2.3. Détermination du ferrailage

On a modélisé le mur en élément Shell, les résultats des moments sont obtenus par le logiciel SAP2000.

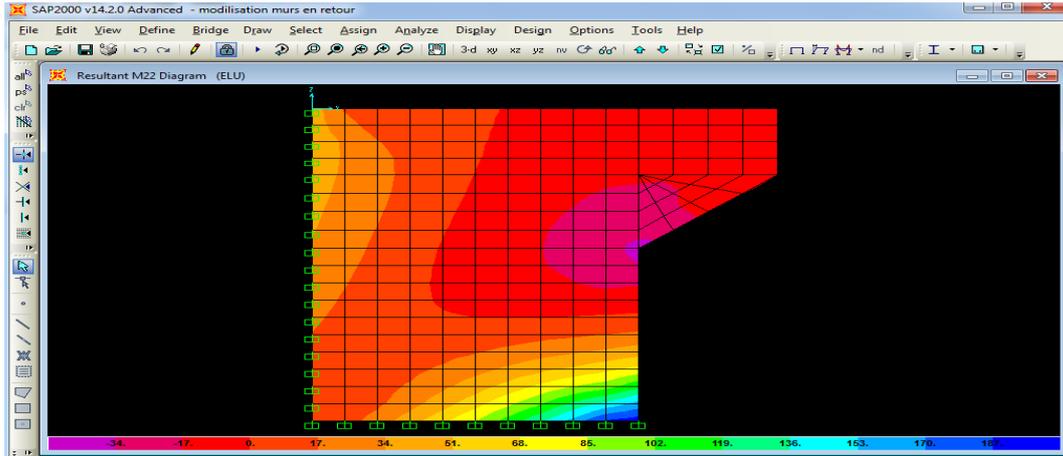


Figure 7.5. Modélisation du mur en retour

| Moment (t.m) Effort tranchant (t) | Sens vertical | | Sens horizontal | |
|--------------------------------------|---------------|--------|-----------------|--------|
| | M22 | F22 | M11 | F11 |
| ELU | 196.2332 | 355.6 | 148.5626 | 238.73 |
| ELS | 93.9661 | 263.41 | 70.3686 | 176.83 |

Tableau 7.5. Moments et efforts tranchants à L'ELU et L'ELS

- **Sens vertical**

À L'aide de logiciel LOGIBAT (SOCOTEC).

On adoptera :

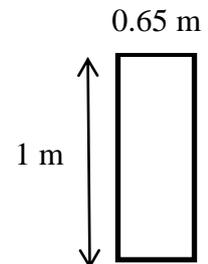
Côté Remblai :

7T20 (21,99 cm²) partie inférieure ; espacement=15 cm

7T16 (14,07 cm²) partie supérieure ; espacement=15 cm

Autre côté :

T14 partie inférieure et supérieure ; espacement=15 cm



- **Sens horizontal**

On adoptera :

Côté Remblai :

7T16 (14,07cm²) partie inférieure ; espacement=15 cm

7T14 (10,78 cm²) partie supérieure ; espacement=15 cm

Autre côté :

T14 partie inférieure et supérieure ; espacement=15 cm

- **Condition de non fragilité**

$$A_{s \min} \geq 0,23 \times b \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0,23 \times 1 \times 0,54 \times \frac{2,7}{400} = 8,38 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 36,06 \text{ cm}^2 > 8,38 \text{ cm}^2 \Rightarrow \text{condition vérifiée}$$

9. MUR DE FRONT

Le mur frontal est soumis à des sollicitations dues essentiellement aux charges permanentes (poids propre de la superstructure, poussée des terres), surcharges sur remblais et les surcharges d'exploitation.

9.1. Les sollicitations du mur de front

Mur garde grève : $0,25 \times 2 \times 2,5 = 1,25$ t/ml

Corbeau d : $0,5 \times 0,4 \times 2,5 = 0,5$ t/ml

Corbeau g : $0,75 \times 0,4 \times 2,5 = 0,75$ t/m

: $0,5 \times 0,4 \times 2,5 = 0,5$ t/m

Mur de front : $2,65 \times 1,1 \times 2,5 = 7,287$ t/ml

Réaction du tablier : $308,95/10 = 30,895$ t/ml

Poussée des terres : $\frac{1}{2} \times 0,33 \times 2 \times (6,2)^2 = 12,8$ t/ml

Surcharge du remblai horizontal : $0,33 \times 1,2 \times 4,7 = 1,879$ t/ml

Surcharge de Mc120 : $118,60/9,3 = 12,75$ t/ml

9.2. Combinaison fondamentale

– ELU

On prendra les Combinaisons des charges les plus défavorables.

Combinaison fondamentale : $ELU = 1,35G + 1,5Q + 1,35Mc120 + 0,8QvI$

| Eléments | coef | Vi(t) | Hi (t) | D/0(m) | M/0 (t.m2) |
|-----------------------------------|------|-------|--------|--------|------------|
| murs garde grève | 1,35 | 1,69 | / | -0,43 | -0,72 |
| murs de front | 1,35 | 9,84 | / | 0,00 | 0,00 |
| corbeau d | 1,35 | 0,68 | / | -0,75 | -0,51 |
| Corbeau g | 1,35 | 1,01 | / | 0,75 | 0,76 |
| Corbeau g | 1,35 | 0,68 | / | 0,68 | 0,46 |
| Poussée des terres | 1,5 | / | 19,20 | 1,57 | 30,08 |
| Poussée remblai horizontal | 1,5 | / | 2,82 | 2,35 | 6,62 |
| Réaction tablier | 1,35 | 41,71 | / | 0,00 | 0,00 |
| V.L.T | 0,8 | / | 28,64 | -2,90 | -83,06 |
| Mc120 | 1,35 | 17,21 | / | 0,00 | 0,00 |
| Total | | 72,81 | 50,66 | | -46,36 |

Tableau 7.6. Récapitulatif des moments à l'ELU

Ferraillage du mur de front à l'ELU :

Le mur de front est calculé en flexion composée.

$h = 1,1$ m ; $b = 1$ m ; $d' = 0,1h = 0,11$ m ; $d = 0,9h = 0,99$ m

$N_u = 81,58$ t

Etude des culées

$$M_u = M_s - M_r$$

$$M_u = 46,36 \text{ t.m}$$

$$e = \frac{M_u}{N_u} = 0,568 \text{ m}$$

$$e > \frac{h}{6} = 0,18 \text{ m} \Rightarrow \text{Section partiellement comprimée}$$

$$M_a = M_u + N_u \left(d - \frac{h}{2} \right) \Rightarrow M_a = 46,36 + 81,58(0,99 - 0,55) \Rightarrow M_a = 82,26 \text{ t.m}$$

$$\mu_u = \frac{M_a}{b \times f_{bc} \times d^2}$$

Avec :

$$f_{bc} = 19,83 \text{ Mpa}$$

$$\mu_u = 0,0423 < \mu_r = 0,392 \Rightarrow \text{Section à simple armature.}$$

$$A_2 = 0$$

$$A_1 = \frac{1}{\sigma_{st}} \left(\frac{M_a}{z} - N_u \right)$$

$$\text{Avec : } \sigma_{st} = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 347,82 \text{ Mpa}$$

$$\alpha = 0,054$$

$$z = 0,965 \text{ m}$$

$$A_1 = \frac{1}{347,82} \left(\frac{822,6 \times 10^{-3}}{0,965} - 815,8 \times 10^{-3} \right) = 1,05 \text{ cm}^2$$

Donc : $A_1 > 0$

- On ferraille avec la section non fragile :

$$S.N.F = 0,23 \times b \times d \times (f_t/f_e) \Rightarrow S.N.F = 0,23 \times 1,00 \times 0,99 \times (270/40000) = 15,36 \text{ cm}^2$$

– **ELS**

Combinaison fondamentale : $ELS = G + Q + Mc120 + 0,6Qv1$

| Éléments | coefficient | Vi(t) | Hi (t) | D/0(m) | M/0 (t.m2) |
|---------------------------|-------------|-------|--------|--------|------------|
| murs garde grève | 1 | 1,25 | / | -0,43 | -0,53 |
| murs de front | 1 | 7,29 | / | 0,00 | 0,00 |
| corbeau g | 1 | 0,50 | / | -0,75 | -0,38 |
| Corbeau | 1 | 0,75 | / | 0,75 | 0,56 |
| | 1 | 0,50 | / | 0,68 | 0,34 |
| poussée ds terres | 1 | / | 12,80 | 1,57 | 20,05 |
| pou.sur.horizontal | 1 | / | 1,88 | 2,35 | 4,42 |
| -réaction. Tablier | 1 | 30,90 | / | 0,00 | 0,00 |
| V.L.T | 0,6 | / | 21,48 | -2,90 | -62,29 |
| Mc120 | 1 | 19,25 | / | 0,00 | 0,00 |
| Total | | 60,43 | 36,16 | | -37,83 |

Tableau 7.7. Récapitulatif des moments à l'ELS

$$N_s = 60,43 \text{ t}$$

$$M_s = 37,83 \text{ t.m}$$

On augmente la section d'armature on adopte :

$$A_1 = 12,06 \text{ cm}^2 \text{ (6T16)} ; \text{ espacement} = 16 \text{ cm}$$

on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{bc} = 3,73 \text{ MPa} < \overline{\sigma}_{bc} = 1800 \text{ t/m}^2 \Rightarrow \text{condition vérifiée} \\ \sigma_{st} = -79,9 \text{ MPa} < \overline{\sigma}_{st} = 21560 \text{ t/m}^2 \Rightarrow \text{condition vérifiée} \end{array} \right.$$

10. ETUDE DE LA SEMELLE DE LIAISON

Dans le cas des appuis de pont, les types de fondation employée varient en fonction de l'éloignement du « bon sol ».

Dans le cas de notre ouvrage, le bon sol se trouve loin, la situation efficace consiste à opter pour une fondation sur pieux nécessairement solidarisisés en tête par une semelle très rigide disposée au-dessous du niveau des plus grands affouillements.

10.1. Pré dimensionnement

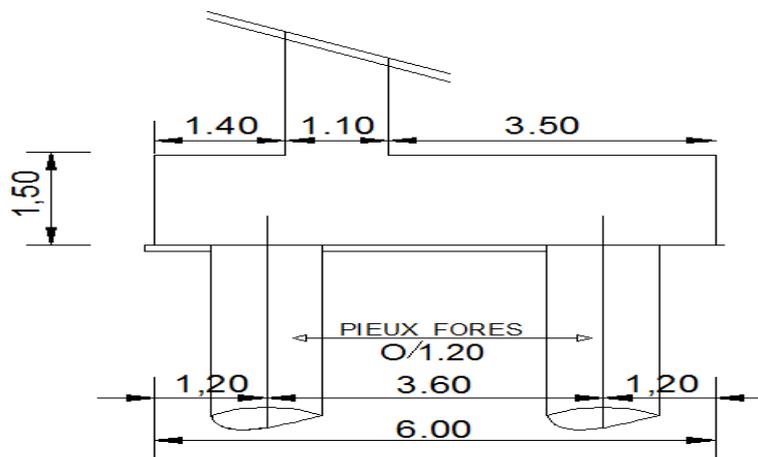


Figure 7.6. Pré dimensionnement de la semelle de liaison

- La formule de l'entraxes entre les pieux est donnée par :

$$L \geq 3 \times \varnothing \Rightarrow L \geq 3 \times 1,2 \Rightarrow L \geq 3,6 \text{ m}$$

On prend : $L = 3,6 \text{ m}$

- La largeur de la semelle est donnée par :

$$A \geq L + \varnothing p + 30 \text{ cm} \Rightarrow A \geq 3,6 + 1,2 + 0,3 \Rightarrow A \geq 5,1 \text{ m}$$

On prend : $A = 6,00 \text{ m}$

- La longueur de la semelle est donnée par :

$$B \geq \max [A ; \emptyset] + 30 \text{ cm}$$

$$B \geq \max [6,00 ; 1,2] + 30 \text{ cm}$$

$$B \geq 6,3$$

On prend : $B = 13,20 \text{ m}$

On adopte le nombre des pieux est égal à 6 pieux de diamètre $\emptyset = 1,2 \text{ m}$

La hauteur de la semelle est calculée selon la méthode des bielles :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \geq 45^\circ \\ h \geq \frac{L}{2} - \frac{a}{4} \end{array} \right.$$

Donc, les dimensions de la semelle sont :

$$A = 6,00 \text{ m}$$

$$B = 13,20 \text{ m}$$

$$H = 1,50 \text{ m}$$

10.2. Sollicitations

10.2.1. Efforts horizontaux

- Variation linéaire du tablier : 24,812 t
- Freinage : 6,115 t
- Séisme : 45,38 t

10.2.2. Efforts verticaux

- Poids propre de la culée

| Eléments | formule | Vi(t) |
|----------------------------|--|---------|
| murs garde grève | $2 \times 0,25 \times 10 \times 2,5$ | 12,5 |
| corbeau gauche | $0,5 \times 0,4 \times 9,7 \times 2,5$ | 4,85 |
| corbeau droite | $0,75 \times 0,4 \times 9,7 \times 2,5$ | 7,275 |
| | $0,5 \times 0,4 \times 9,7 \times 2,5$ | 2,425 |
| murs de front | $2,65 \times 1,1 \times 10 \times 2,5$ | 72,875 |
| dalle de transition | $0,3 \times 4 \times 9,6 \times 2,5$ | 28,8 |
| murs de retour | $4,7 \times 3,35 \times 0,6 \times 0,75$ | 23,617 |
| | $1 \times 1,25 \times 0,6 \times 2,5$ | 1,875 |
| | $1,1 \times 1,25 \times 0,6 \times 2,5$ | 1,031 |
| Semelle | $1,5 \times 6 \times 13,2 \times 2,5$ | 297 |
| Total | | 452,248 |

Tableau 7.8. Poids propre de la culée

- **Poussée des terres**

$$Ph = \frac{1}{2} \times Ka \times \gamma \times h^2 \times L$$

Avec :

Ka : Coefficient actif de poussée

$$Ka = tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) = 0,333 \text{ Avec : } \phi=30^\circ$$

γ : Poids volumique du remblai = 2 t/m³

h : Hauteur totale de la culée H = 6,2 m

L : Longueur du mur de front L = 10 m

$$Ph = \frac{1}{2} \times 0,333 \times 2 \times (6,2)^2 \times 10 = 128 \text{ t}$$

- **Poids des terres**

- Sur le patin (gauche) : on considère qu'il n'y a pas de remblai
- Sur le patin (droite) : $P_{td} = 3,5 \times 4,7 \times 10 \times 2 = 329 \text{ t}$

- **Surcharge de remblai :**

La surcharge du remblai supportant une chaussée q = 1 t/m².

Majorée de 20% = 1,2 t/m².

- **Poussée de la surcharge**

$$Ph = Ka \times q \times h \times L$$

$$Ph = 0,333 \times 1,2 \times 4,7 \times 10$$

$$Ph = 18,79 \text{ t}$$

$$Pv = 3,5 \times 1,2 \times 10$$

$$Pv = 42 \text{ t}$$

- **La poussée dynamique des terres**

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \gamma H^2 [(1 \pm k_v) K_{ad} - K_a]$$

$K_h = A = 0,12$ (Coefficient d'accélération de zone groupe 2 (Pont important)).

$$K_v = 0,3 K_h = 0,036$$

Dans les conditions sismiques le coefficient de poussée sera déterminé par la formule de MONOBE- OKABE

Avec:

$$K_{ad} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos^2\theta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin\phi \sin(\phi - \beta - \theta)}{\cos\theta \cos\beta}} \right]^2} = \frac{\cos^2(23.40)}{\cos^2(7.095) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(30) \sin(23.40)}{\cos(6.60) \cos(0)}} \right]^2} = 0,408$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{k_h}{1 \pm k_v} \right) = \arctan \left(\frac{0.12}{1 \pm 0.036} \right) = 6,60^\circ$$

H : La hauteur du mur (H = 6,2m)

γ : Le poids volumique des terres ($\gamma = 2 \text{ t/m}^3$)

φ : L'angle de frottement interne du remblai sans cohésion ($\varphi = 30^\circ$)

β : Angle de la surface du remblai sur l'horizontal. ($\beta = 0$)

$$F_{ad} = 3,56 \text{ t/m}$$

- **La poussée due à la surcharge**

$$F_{ad}(q) = q \times H [(1 \pm k_v)K_{ad}]$$

$$F_{ad}(q) = 3,14 \text{ t/m}$$

- **Sous charges permanentes**

| Eléments | Formule | Vi(t) | D/0(m) | M/0 (t.m2) |
|---------------------|---|--------|--------|------------|
| murs garde grève | $2 \times 0,25 \times 10 \times 2,5$ | 12,50 | 2,38 | 29,69 |
| corbeau d | $0,5 \times 0,4 \times 9,7 \times 2,5$ | 4,85 | 2,70 | 13,10 |
| corbeau g | $0,75 \times 0,4 \times 9,7 \times 2,5$ | 7,28 | 1,20 | 8,73 |
| corbeau g | $0,5 \times 0,4 \times 9,7 \times 2,5$ | 2,43 | 1,27 | 3,07 |
| murs de front | $2,65 \times 1,1 \times 10 \times 2,5$ | 72,88 | 1,95 | 142,11 |
| dalle de transition | $0,3 \times 4 \times 9,6 \times 11,52 \times 2,5$ | 28,80 | 4,50 | 129,60 |
| murs de retour | $4,7 \times 3,35 \times 0,6 \times 0,75$ | 23,62 | 4,18 | 98,60 |
| murs en retour | $1 \times 1,25 \times 0,6 \times 2,5$ | 1,88 | 6,48 | 12,14 |
| murs en retour | $1,1 \times 1,25 \times 0,6 \times 2,5$ | 1,03 | 6,27 | 6,46 |
| Semelle | $1,5 \times 6 \times 13,2 \times 2,5$ | 297,00 | 3,00 | 891,00 |
| Total | | 452,25 | | 1334,50 |

Tableau 7.9. Sous charge permanente

10.3. Combinaison des charges

Les combinaisons de charges sont conformes au règlement BAEL91.

On prendra les Combinaisons des charges les plus défavorables

– **ELU**

a) Combinaison Fondamentale

Situation d'Exploitation : $1,35 G + 1,35 Mc120 + 1,5Q + 0,8Q_{vt}$

b) Combinaison Accidentelle

Situation accidentelle : $1,036 G + Q + F_a + 0,2 Mc120$

10.4. Vérification de la stabilité et les contraintes sous semelle

Combinaison fondamentale : $ELU=1,35G+1,5Q+1,35Mc120+0,8Qvl$

| Eléments | Coefficient | Vi (t) | Hi (t) | d /0 (m) | M/0 (m) |
|---------------------------|-------------|---------|--------|----------|---------|
| murs garde grève | 1,35 | 16,88 | / | 0,63 | 10,55 |
| corbeau d | 1,35 | 6,55 | / | 0,30 | 1,96 |
| corbeau g | 1,35 | 9,82 | / | 1,80 | 17,68 |
| Corbeau g | 1,35 | 3,27 | / | 1,73 | 5,67 |
| murs de front | 1,35 | 98,38 | / | 1,05 | 103,30 |
| dalle de transition | 1,35 | 38,88 | / | -1,50 | -58,32 |
| murs en retour | 1,35 | 31,88 | / | -1,18 | -37,46 |
| murs en retour | 1,35 | 2,53 | / | -3,48 | -8,80 |
| murs en retour | 1,35 | 1,39 | / | -3,27 | -4,55 |
| Semelle | 1,35 | 400,95 | / | 0,00 | 0,00 |
| poussée des terres | 1,35 | / | 172,80 | 2,07 | 357,11 |
| Poids .terre | 1,35 | 529,20 | / | -1,25 | -661,50 |
| Poussée .surch.horizontal | 1,5 | / | 28,19 | 2,35 | 66,23 |
| Poussée .surch.vertical | 1,5 | 63,00 | / | -1,25 | -78,75 |
| réaction tablier | 1,35 | 417,08 | / | 1,40 | 583,92 |
| V.L.T | 0,8 | / | 19,86 | 4,40 | 87,37 |
| Mc120 | 1,35 | 160,03 | / | 1,40 | 224,04 |
| Total | | 1779,85 | 220,84 | | 608,45 |

Tableau 7.10. Récapitulatif des sollicitations à l'ELU

La stabilité de l'ensemble est assurée par le biais des fondations.

Etude des culées

Combinaison fondamentale : ELS =G+Q+Mc120+0,6Qvl

| Elément | Coefficient | Vi (t) | Hi (t) | d /0 (m) | M/0 (m) |
|----------------------------------|-------------|---------|--------|----------|---------|
| murs garde grève | 1 | 12,50 | / | 0,63 | 7,81 |
| corbeau d | 1 | 4,85 | / | 0,30 | 1,46 |
| corbeau g | 1 | 7,28 | / | 1,80 | 13,10 |
| corbeau g | 1 | 2,43 | / | 1,73 | 4,20 |
| murs de front | 1 | 72,88 | / | 1,05 | 76,52 |
| dalle de transition | 1 | 28,80 | / | -1,50 | -43,20 |
| murs en retour | 1 | 23,62 | / | -1,18 | -27,75 |
| murs en retour | 1 | 1,88 | / | -3,48 | -6,52 |
| murs en retour | 1 | 1,03 | / | -3,27 | -3,37 |
| Semelle | 1 | 297,00 | / | 0,00 | 0,00 |
| poussée des terres | 1 | / | 128,00 | 2,07 | 264,52 |
| poids des terres | 1 | 392,00 | / | -1,25 | -490,00 |
| Poussée .surch.horizontal | 1 | / | 18,79 | 2,35 | 44,16 |
| Poussée .surch.vertical | 1 | 42,00 | / | -1,25 | -52,50 |
| Réaction de tablier | 1 | 308,95 | / | 1,40 | 432,53 |
| V.L.T | 0,6 | / | 14,89 | 4,40 | 65,52 |
| Mc120 | 1 | 118,54 | / | 1,40 | 165,96 |
| Total | | 1313,74 | 161,68 | | 452,44 |

Tableau 7.11. Récapitulatif des sollicitations à l'ELS

La stabilité de l'ensemble est assurée par le biais des fondations.

Etude des culées

Combinaison accidentelle : ELU acc=1,036G+Q+0,2Mc120+Fa

| Eléments | Coefficient | Vi (t) | Hi (t) | d /0 (m) | M/0 (m) |
|------------------------------|-------------|---------|--------|----------|---------|
| murs garde grève | 1,036 | 12,95 | / | 0,63 | 8,09 |
| corbeau d | 1,036 | 5,02 | / | 0,30 | 1,51 |
| corbeau g | 1,036 | 7,54 | / | 1,80 | 13,57 |
| corbeau g | 1,036 | 2,51 | / | 1,73 | 4,35 |
| murs de front | 1,036 | 75,50 | / | 1,05 | 79,27 |
| dalle de transition | 1,036 | 29,84 | / | -1,50 | -44,76 |
| murs en retour | 1,036 | 24,47 | / | -1,18 | -28,75 |
| murs en retour | 1,036 | 1,94 | / | -3,48 | -6,75 |
| murs en retour | 1,036 | 1,07 | / | -3,27 | -3,49 |
| Semelle | 1,036 | 307,69 | / | 0,00 | 0,00 |
| poussée des terres | 1,036 | / | 9,84 | 4,13 | 40,68 |
| | 1,036 | / | 132,61 | 2,07 | 273,97 |
| pooids.terre arrière | 1,036 | 406,11 | / | -1,25 | -507,64 |
| Poussée .surch.horizontal | 1 | / | 4,31 | 2,35 | 10,13 |
| poussée .surch.vertical | 1 | 42,00 | / | -1,25 | -1,25 |
| réaction. Tablier | 1,036 | 320,07 | / | 1,40 | 448,10 |
| efforts sismique (Fa) | 1 | / | 84,82 | 4,40 | 373,21 |
| Mc120 | 0,2 | 23,71 | / | 1,40 | 33,19 |
| Total | | 1260,42 | 231,58 | | 693,43 |

Tableau 7.12. Récapitulatif des sollicitations à la combinaison accidentelle

La stabilité de l'ensemble est assurée par le biais des fondations.

10.5. Réactions des pieux de la culée

On applique la méthode des bielles, tel que cette méthode n'est valable que si ces deux conditions suivantes seront vérifiées :

$$\begin{cases} \alpha \geq 45^\circ \\ h \geq \frac{L}{2} - \frac{a}{4} \end{cases}$$

Dans notre cas, ces conditions sont vérifiées.

a) Combinaison fondamentale

– ELU

$$M_u = 608,45 \text{ t.m}$$

$$N_u = 1799,85 \text{ t}$$

$$\text{Soit la section d'un pieu : } S = \pi r^2 = 1,1304 \text{ m}^2$$

On a deux files de 3 pieux donc : $B=6S$

Le moment d'inertie est le suivant : $I = 3 \times 2 \times S \times V^2 = 19,44 \times S \text{ m}^4$

$V = 1,8 \text{ m}$

On a:

$$\sigma = \frac{N_u}{B} \pm \frac{M_u \times V}{I}$$

$R = \sigma \times S$

D'où:

$$R_1 = \frac{1779,85}{6} + \frac{608,45 \times 1,8}{19,44} = 352,97 \text{ t}$$

$$R_2 = \frac{1654,58}{8} - \frac{608,45 \times 1,8}{19,44} = 240,30 \text{ t}$$

– **ELS**

$M_s = 452,44 \text{ t.m}$

$N_s = 1313,74 \text{ t}$

On a:

$$\sigma = \frac{N_u}{B} \pm \frac{M_u \times V}{I}$$

$R = \sigma \times S$

D'où:

$$R_1 = \frac{1313,74}{6} + \frac{452,44 \times 1,8}{19,44} = 260,84 \text{ t}$$

$$R_2 = \frac{1313,74}{8} - \frac{452,44 \times 1,8}{19,44} = 177,06 \text{ t}$$

b) Combinaison accidentelle

$M_u \text{ acc} = 693,43 \text{ t.m}$

$N_u \text{ acc} = 1260,42 \text{ t}$

On a:

$$\sigma = \frac{N_u}{B} \pm \frac{M_u \times V}{I}$$

$R = \sigma \times S$

D'où:

$$R_1 = \frac{1260,42}{6} + \frac{693,43 \times 1,8}{19,44} = 274,27 \text{ t}$$

$$R_2 = \frac{1260,42}{8} - \frac{693,43 \times 1,8}{19,44} = 145,86 \text{ t}$$

Efforts obtenus :

$$N1=260,84 \text{ t} ; N2=177,06 \text{ t}$$

$$T1= (0,475/1,45) \times 260,84 = 85,44 \text{ t}$$

$$T2= (2,575/1,45) \times 177,06 = 314,43 \text{ t}$$

10.6. Estimation de la charge nominale

La charge nominale est la charge admissible vis-à-vis de la résistance du sol. Pour les besoins de l'estimation de la charge nominale de ces pieux nous allons référer à la méthodologie exposée par J-Costet et Sanglerat.

– Méthode Sanglerat

$$Q_n = \frac{A}{3} Q_p + \frac{Q_f}{2}$$

Avec :

A : aire de la section droit du pieu.

$$\varphi=20,73^\circ ; C = 6,2 \text{ Kpa} ; D = 21 \text{ m} ; (N_c = 15,81 ; N_q = 7,07 ; N_\gamma = 4,19) ; \gamma = 2 \text{ t/m}^3 ;$$

$$K_p \gamma = 1,5 ; \delta = \frac{2}{3} \varphi = 13,82^\circ$$

Q_f : frottement latéral mobilisable le long du fut à la rupture :

$$Q_f = (K_p \gamma \sin \delta) \gamma \frac{D^2}{2} p$$

Avec :

P : périmètre du pieu.

D : longueur du pieu.

K_pγ : coefficient de butée.

δ : Obliquité de la butée par rapport au pieu.

γ : densité du milieu considéré.

$$Q_f = (1,5 \sin 13,82) \times 2 \times \frac{21^2}{2} \times 3,768 = 595,39 \text{ t}$$

Q_p : résistance de pointe à la rupture :

$$Q_p = \gamma D N_q + 1,2 c N_c$$

$$K_a = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) = 0,472$$

$$K_p = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) = 2,11$$

$$Q_p = 2 \times 21 \times 7,07 + 1,2 \times 0,62 \times 15,81 = 308,70 \text{ t}$$

$$Q_n = \frac{\pi(1,2)^2}{3 \times 4} \times 308,70 + \frac{595,39}{2} = 414,072 \text{ t}$$

$$\text{– ELU : } \frac{Q_f + Q_p}{1,4} = \frac{595,39 + 308,70}{1,4} = 645,77 \text{ t}$$

- **ELS** : $\frac{Qf}{2} + \frac{Qp}{3} = \frac{595,39}{2} + \frac{308,70}{3} = 400,6 \text{ t}$
- **ELU acc** : $\frac{Qf+Qp}{1,3} = \frac{595,39+308,70}{1,3} = 695,45 \text{ t}$

| | Pile | | φ=20,73° D=21m |
|---------------|--------|--------|-------------------|
| | R1 | R2 | |
| ELU | 212,09 | 201,55 | 645,77 |
| ELUacc | 177,34 | 113,58 | 400,6 |
| ELS | 156,29 | 148,44 | 695,45 |

Tableau 7.13. Réactions des pieux sous les différentes combinaisons

10.7. Ferrailage de la semelle de liaison

- **Les Armatures principales**

On prend 24HA25=117,84 cm² avec esp 15 cm

- Armature constructive :

On prend HA20 esp 15 cm

- **Les armatures transversales**

$A_{tinf} = 1/4 \times A_{linf} = 117,84/4 = 29,46 \text{ cm}^2$, on prend 17T16 = 34,18 cm² avec esp 20 cm

- Armature constructive :

On prend HA16 esp 20cm

10.8. Ferrailage des pieux de la culée

Pour le calcul de l'effort et le moment pour chaque pieu, on a utilisé un programme GWBASIC élaboré par la SEROR.

a) Paramètre de calcul

Dans ce programme, on utilise certains paramètres :

E : module de déformation du béton $2 \times 10^6 \text{ t/m}$

K : coefficient de rigidité du sol.

Nombre de fils égale : 2.

Diamètre extérieur des pieux : 1.2 m.

Condition en pied : libre

Nombre de couches : 2 couches.

Couche 1 : des Galets de différent taille et de nature dur à très dur à matrice sableuse (épaisseur entre 1,5 et 19,5 m)

Dans notre cas on a 2 coefficients de rigidité.

• **Pour les sollicitations de courte durée (cas Accidentelle)**

D'après le fascicule 62 titre V :

$$K_f = \frac{12Em}{\frac{4}{3} \times \frac{B_0}{B} (2,65 \times \frac{B}{B_0})^{\alpha + \alpha}} \text{ pour } B \geq B_0$$

$$K_f = \frac{12Em}{\frac{4}{3} \times (2,65)^{\alpha + \alpha}} \text{ pour } B \geq B_0$$

Avec :

$B_0 = 0,6$ m ; B : diamètre des pieux

$E_m = 65$ MPa

α : étant un coefficient caractérisant le sol, donné par les tableaux du fascicule 62

$\alpha = 1/2$

$$K_f = \frac{12Em}{\frac{4}{3} \times \frac{B_0}{B} (2,65 \times \frac{B}{B_0})^{\alpha + \alpha}} = \frac{12 \times 65}{1,33 \left(\frac{0,6}{1,2}\right) \left(2,65 \times \frac{1,2}{0,6}\right)^{0,5 + 0,5}} = 38405,7 \text{ t/m}^2$$

• **Pour les sollicitations de longue durée (cas fondamentale)**

$$K_1 = K_f / 2 = 19201,85 \text{ t/m}^2$$

Les sollicitations au niveau de la semelle:

| | ELU Fondamentale | ELU Accidentelle | ELS Rare |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| N(t) | 1779,85 | 1260,42 | 1313,74 |
| M(t.m) | 608,45 | 693,43 | 452,44 |
| T (t) | 220,84 | 231,58 | 161,68 |

Tableau 7.14. Sollicitations au niveau de la semelle

b) Résultats du programme

Tassement : 0,13086 mm

Rotation : 0,00019 rd

Déplacement horizontale à la base : 0,38013mm

c) Ferrailages des pieux (ELS)

$N_1 = 202,862$ t

$N_2 = 125,572$ t

$M_s = 9,382$ t.m

Ces efforts donnent un ferrailage négligeable, soit un ferrailage minimum de :

$0,8\% \times (A. \text{ pieu})$ (puisque'il s'agit d'une zone sismique) ;

Nous aboutirons sur une section de 19 HA 25.

– **Armatures transversales**

$\phi_l = 20$ mm donc on adopte $\phi_t = 14$ mm

Etude des culées

Espacement des cerces $=12\phi_1=24$ cm

D'après le RPOA : puisqu'on a des pieux en béton, on met des renforts sur une profondeur $2 \times d=2,4$ m à partir de la tête du pieu avec un esp $=10$ cm.

Conclusion générale

L'élaboration d'un projet de pont est une expérience enrichissante dans le cycle de formation d'un étudiant ingénieur, qui nécessite la réflexion d'une part, et des connaissances étendues dans le domaine d'emploi des différents types de structures d'autre part. L'ingénieur doit donc faire preuve de rigueur et d'un sens de l'observation très développé.

Cette étude nous a permis d'approfondir nos connaissances et ceci en complétant la formation acquise au sein du département de génie civil, aussi grâce aux calculs effectués manuellement, nous avons acquis des ordres de grandeurs très importantes qui nous serviront dans le domaine professionnel.

Nous avons fait suivre tous les calculs et les étapes nécessaires pour concevoir un pont qui remplisse tous les critères demandés en veillant au bon respect des normes de sécurité.

Bibliographie

- (1) : **Les ponts APMBTP08**. Lycée du B.T.P.Gaudier Brzka-Saint Jean de brayes-Orléans.
- (2) : **Lacroix M.R et all.** Règles techniques de conception et de calculs des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites. Fascicule 62 (titre I-section I) BAEL 91 révisé 99.
- (3) : **Guide S.E.T.R.A.** Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes (Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension).
- (4) : **Bekkal Brikci W, Dali Youcef .** Etude d'un ouvrage d'art en béton précontraint. Université AbouBakr Blekaid, Tlemcen, Algérie.
- (5) : **Document technique règlementaire D.T.R.** Règles définissant les charges à appliquer pour le calcul et les épreuves des ponts routes. Fascicule 61 titre II.
- (6) : **Yazid A.** Béton précontraint : cours et exercices. Centre universitaire de Bechar, institue de génie civil.
- (7) : **Lacroix M.R et all.** Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites. Fascicule 62(titre I-section II) BPEL 91 révisé 99.
- (8) : **Document technique règlementaire D.T.R.** Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art. RPOA 2008.
- (9) : **Document technique règlementaire D.T.R.** Règles parasismiques Algérien. RPA 99 version 2003.
- (10) : Logiciel SaP2000.