

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil

Laboratoire de Génie Parasismique et Dynamique des Structures

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Thème :

Etude d'un pont rail réalisé par poussage dans le cadre de l'extension du Métro Ain Nâadja-Baraki

Réalisé par :

Nadir OUHACHI

Younes LOUNIS

Encadré par :

Mme Djamila CHERID

Mme Hafida MOHABEDDINE

Présenté et soutenu publiquement le (21/06/2017)

Composition du Jury

Président	M. A.LARIBI	Dr	ENP
Promotrice	Mme D. CHERID	MAA	ENP
Promotrice	Mme H. MOHABEDDINE	MAA	ENP
Examineur	M. S.LAKEHAL	MAA	ENP
Examineur	M. B.K.BENAZZOUZ	MCB	ENP

ENP 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil

Laboratoire de Génie Parasismique et Dynamique des Structures

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Thème :

Etude d'un pont rail réalisé par poussage dans le cadre de l'extension du Métro Ain Nâadja-Baraki

Réalisé par :

Nadir OUHACHI

Younes LOUNIS

Encadré par :

Mme Djamila CHERID

Mme Hafida MOHABEDDINE

Présenté et soutenu publiquement le (21/06/2017)

Composition du Jury

Président	M. A.LARIBI	Dr	ENP
Promotrice	Mme D. CHERID	MAA	ENP
Promotrice	Mme H. MOHABEDDINE	MAA	ENP
Examineur	M. S.LAKEHAL	MAA	ENP
Examineur	M. B.K.BENAZZOZ	MCB	ENP

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements à nos promotrices Mme D.CHERID et Mme H.MOHABEDDINE, nous voudrions également leurs témoigner notre gratitude pour tout l'aide qu'elles nous ont procuré afin de mener ce travail à bon port.

Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir honoré notre soutenance et pour l'effort fourni afin de juger ce modeste travail.

Nos profondes reconnaissances à tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique et particulièrement ceux qui ont contribué à notre formation, avec beaucoup de compétence et de dévouement.

Nos remerciements s'étendent également à :

- M. GANI, Chef de département Travaux Souterrains à l'EMA, pour nous avoir proposé le thème de ce travail.
- M. Ali AMINI, Directeur technique à COSIDER TP, pour l'énorme apport technique qui nous a apporté, et pour son précieux temps qui nous a consacré au détriment de son travail.
- M. DJERRIR, Expert en Ouvrages d'Art, pour nous avoir accueillis au sein de son bureau, pour l'intérêt qu'il a porté à notre projet, et surtout pour ses bonnes explications qui nous ont éclairé le chemin.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je rends grâce à dieu et dédier ce modeste travail

*A mon père, décédé trop tôt, pour qui l'instruction représentait beaucoup,
J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste
comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le
salut de son âme.*

Puisse -Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !

*A ma mère, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel
et ma considération pour les sacrifices qu'elle a consenti pour mon instruction et mon
bien être et qui m'a guidé pendant les moments les plus pénibles de ce long
chemin.*

A mes frères et sœurs, mes cousins et cousines qui m'ont épaulé en tout temps.

*A tamchicht-iw qui était toujours là pour moi et soutenue durant cette période
de préparation avec ces encouragements et ses conseils précieux.*

A tous mes amis sans exception

A mon binôme et à toute sa famille

A tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ce travail.

LOUNIS Younes

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents, qu'aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Ma grande Mère, tes prières et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Mes chères sœurs Dyhia et Kenza et mon unique frère Ahcène qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.

Toute la famille OUHACHI, je vous remercie de m'avoir encouragé et d'avoir cru en moi.

Tous mes amis, et tous ceux que j'aime.

OUHACHI Nadir

ملخص

الغرض من هذا العمل هو دراسة جسر السكك الحديدية بالدفع. الجسر يبلغ طوله 1464 متر، ويتألف من قسمين منحنيين ذو أطوال 918 متر و379.5 متر، مع انصاف قطر 1500 متر و1195متر، وجزء مستقيم بطول 166.5 متر، كرابط بين المنحنيين.

يتكون الجسر من 35 مقطع، وأطولهم يبلغ 51مترًا. يبلغ عرض الجسر 9.40 متر، مرتكزا على 34 مسندا من الخرسانة المسلحة.

تم تقييم القوى المؤثرة على الجسر باستخدام برنامج التحليل الهيكلي روبوت.

الكلمات المفتاحية

جسر مدفوع، جسر السكك الحديدية، مقدم الرأس، خرسانة مضغوطة

Abstract

The object of this work is the study of a railroad bridge made by pushing. The bridge has a length of 1464 m, consisting of two curved parts with lengths 918m and 379.5m, with radius of 1500m and 1195m; and a straight part made on the spot of length of 166.5m, which will connect the two curves.

The structure consists of 35 spans, the main one of which is 51 m long. The roadway has a total width of 9.40 m, resting on 34 reinforced concrete piles.

The stresses acting on the structure were evaluated using Robot Structural Analysis software.

Key words

Incremental launched bridge, railroad Bridge, before metal nozzle, concrete prestressed

Résumé

L'objet de ce travail est l'étude d'un pont rail réalisé par poussage. L'ouvrage a une longueur de 1464 m, constitué par deux tronçons courbes ayant les longueurs 918m et 379.5m, avec des rayons de 1500m et 1195m ; et un tronçon droit réalisé sur place de longueur de 166.5m, qui reliera les deux courbes.

L'ouvrage est composé de 35 travées, dont la principale a une longueur de 51m. Le tablier a une largeur totale de 9.40 m, reposant sur 34 piles en béton armé.

Les sollicitations agissantes sur la structure ont été évaluées à l'aide de logiciel Robot Structural Analysis.

Mots clés

Pont poussé, pont rail, avant-bec, béton précontraint

Table des matières

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Introduction Générale..... 15

Chapitre I : Généralités

I.1.	Introduction	18
I.2.	Présentation de Projet.....	18
I.3.	Présentation de l'ouvrage.....	18
I.4.	Les données fonctionnelles.....	19
I.4.2.	Profil en long.....	19
I.4.3.	Profil en travers	20
I.5.	Les Données naturelles	20
I.5.1.	Topographie	20
I.5.2.	La reconnaissance géotechnique.....	21
I.6.	Actions susceptibles de solliciter l'ouvrage.....	25
I.6.1.	Actions thermiques	25
I.6.2.	Actions dues au vent.....	25
I.6.3.	Actions sismiques	25
I.7.	Les éléments de l'ouvrage	25
I.7.1.	Les piles.....	25
I.7.2.	Les culées.....	26
I.7.3.	Les appareils d'appui.....	27
I.7.4.	Chemin de fer.....	28
I.8.	Matériaux de construction	28
I.8.1.	Béton.....	28
I.8.2.	Acier	28
I.9.	Historique des ponts poussés.....	29
I.9.1.	Principes généraux du poussage	29
I.9.2.	Types des ponts poussés	30
I.9.3.	Avantages et conditions du procédé.....	32
I.10.	Conclusion	32

Chapitre II : Pré-dimensionnement de la section transversale

II.1.	Introduction	34
II.2.	Largeur total du hourdis B.....	34
II.3.	Epaisseur du hourdis supérieur	35

II.4.	L'épaisseur des âmes.....	35
II.5.	La hauteur du caisson	35
II.6.	Longueur d'encorbellement	36
II.7.	L'épaisseur de l'hourdis supérieur à l'extrémité.....	36
II.8.	L'épaisseur du hourdis inférieur.....	36
II.9.	L'enracinement de l'encorbellement.....	36
II.10.	L'épaisseur à l'encastrement.....	36
II.11.	La largeur de la base.....	37
II.12.	Caractéristiques de la section	37
II.13.	Conclusion	37

Chapitre III : Estimation des charges et surcharges

III.1.	Introduction.....	39
III.2.	Charges hors trafic.....	39
III.2.1.	Poids propre des éléments structuraux.....	39
III.2.2.	Poids propre des éléments non structuraux.....	39
III.3.	Charges dues au trafic	40
III.3.1.	Les charges verticales.....	40
III.3.2.	Charges horizontales.....	45
III.4.	Actions accidentelles.....	48
III.5.	Combinaisons de charges.....	49
III.5.1.	Combinaisons de charges en cours de poussage	49
III.5.2.	Combinaisons de charges en service.....	49
III.6.	Conclusion	52

Chapitre IV : Calcul des sollicitations

IV.1.	Introduction.....	54
IV.2.	Phase de poussage	54
IV.2.1.	Sollicitations dues au poids propre du tablier	54
IV.2.2.	Sollicitations dues à La dénivellation d'appuis.....	68
IV.2.3.	Moments dus aux Gradient thermique.....	73
IV.3.	Phase de service	74
IV.4.	Conclusion	77

Chapitre V : Etude de la précontrainte

V.1.	Introduction	79
V.2.	Conception de la précontrainte	79
V.2.1.	Précontrainte de poussage.....	79
V.2.2.	Précontrainte de continuité.....	80

V.3.	Etude de la précontrainte.....	82
V.3.1.	Précontrainte de Poussage	82
V.3.2.	Précontrainte de Continuité.....	93
V.4.	Les Pertes de la précontrainte.....	101
V.4.1.	Calcul des pertes pour la précontrainte de continuité.....	101
V.4.2.	Calcul des pertes pour la précontraintes de poussage	113
V.5.	Vérification de l'effort tranchant.....	122
V.5.1.	Détermination de l'effort tranchant.....	122
V.5.2.	Calcul des contraintes de cisaillement limites.....	123
V.5.3.	Calcul de contrainte de cisaillement a l'ELS	123
V.5.4.	Calcul de contrainte de cisaillement à l'ELU	124
V.5.5.	Détermination de l'inclinaison des bielles	124
V.5.6.	Détermination des armatures transversales	125
V.5.7.	Justification du béton	126
V.5.8.	Vérification à la torsion	126
V.5.9.	Justification à L'ELS.....	126
V.5.10.	Justification à L'ELU.....	126
V.6.	Conclusion.....	127

Chapitre VI : Ferrailage de la section transversale

VI.1.	Introduction.....	129
VI.2.	Zones de justifications.....	129
VI.3.	Calcul des Sollicitations	129
VI.3.1.	Charges permanentes	129
VI.3.2.	Charges dues au trafic	131
VI.4.	Combinaison de charges.....	133
VI.5.	Résultats de l'analyse.....	137
VI.5.2.	Sollicitations en flexion composée	137
VI.6.	Ferrailage du voussoir	138
VI.6.1.	Ferrailage des hourdis et de porte-à-faux.....	138
VI.6.2.	Ferrailage des âmes.....	139
VI.7.	Conclusion	139

Chapitre VII : Etude de la pile

VII.1.	Introduction.....	141
VII.2.	Etude de la pile	141
VII.2.1.	Evaluation des Sollicitation.....	142
VII.2.2.	L'effort de poussage appliqué sur la pile.....	143

VII.2.3. Ferrailage de la section.....	145
VII.3. Conclusion	147
Conclusion générale.....	149
Références Bibliographiques.....	150
Annexes.....	151

Liste des Tableaux

Tableau I.1: Essais de laboratoire sur échantillons de sondages.....	22
Tableau I.2: Classification des sols présents sur le site.....	23
Tableau I.3: Résumé des paramètres géotechniques 1.....	24
Tableau I.4: Résumé des paramètres géotechniques 2.....	24
Tableau III.1: longueur déterminante.....	44
Tableau III.2: Valeurs caractéristiques des gradients linéaires de température.....	47
Tableau III.3: Coefficients k_{SUR} pour différentes épaisseurs de revêtement.....	48
Tableau III.4: Combinaisons de charges en cours de poussage.....	49
Tableau III.5: Groups de charges.....	50
Tableau IV.1: Les sollicitations maximales de la phase 1.....	55
Tableau IV.2: les sollicitations maximales de la phase 2.....	56
Tableau IV.3: Les sollicitations maximales de la phase 3.....	56
Tableau IV.4: Les sollicitations maximales de la phase 4.....	56
Tableau IV.5: Les sollicitations maximales de la phase 5.....	57
Tableau IV.6: Les sollicitations maximales de la phase 6.....	57
Tableau IV.7: Les sollicitations maximales de la phase 7.....	57
Tableau IV.8: Les sollicitations maximales de la phase 8.....	58
Tableau IV.9: Les sollicitations maximales de la phase 9.....	58
Tableau IV.10: Les sollicitations maximales de la phase 10.....	58
Tableau IV.11: Les sollicitations maximales de la phase 11.....	59
Tableau IV.12: Les sollicitations maximales de la phase 12.....	59
Tableau IV.13: Les sollicitations maximales de la phase 13.....	59
Tableau IV.14: Les sollicitations maximales de la phase 14.....	60
Tableau IV.15: Les sollicitations maximales de la phase 15.....	60
Tableau IV.16: Les sollicitations maximales de la phase 16.....	60
Tableau IV.17: Les sollicitations maximales de la phase 17.....	61
Tableau IV.18: Les sollicitations maximales de la phase 18.....	61
Tableau IV.19: Les sollicitations maximales de la phase 19.....	61
Tableau IV.20: Les sollicitations maximales de la phase 20.....	62
Tableau IV.21: Les sollicitations maximales de la phase 21.....	62
Tableau IV.22: Les sollicitations maximales de la phase 22.....	62
Tableau IV.23: Les sollicitations maximales de la phase 23.....	63
Tableau IV.24: Les sollicitations maximales de la phase 24.....	63
Tableau IV.25: Les sollicitations maximales de la phase 25.....	63
Tableau IV.26: Les sollicitations maximales de la phase 26.....	64
Tableau IV.27: Les sollicitations maximales de la phase 27.....	64
Tableau IV.28: Les sollicitations maximales de la phase 28.....	64
Tableau IV.29: Les sollicitations maximales de la phase 29.....	65
Tableau IV.30: Les sollicitations maximales de la phase 30.....	65
Tableau IV.31: Les sollicitations maximales de la phase 31.....	65
Tableau IV.32: Les sollicitations maximales de la phase 32.....	66
Tableau IV.33: Sollicitations maximales dues au poids propre de Tronçon1.....	67
Tableau IV.34: Moments de dénivellation de la phase 1.....	70
Tableau IV.35: Moments de dénivellation de la phase 2.....	70

Tableau IV.36: Moments de dénivellation de la phase 3.....	71
Tableau IV.37: Moments de dénivellation de la phase 4.....	71
Tableau IV.38: Moments de dénivellation de la phase 5.....	71
Tableau IV.39: Moments de dénivellation de la phase 6.....	72
Tableau IV.40: Moments de dénivellation de la phase 7.....	72
Tableau IV.41: Moments maximaux dus aux dénivellations d'appuis de Tronçon 1	73
Tableau V.1: Distance d'enrobage minimale.....	82
Tableau V.2: Calcul des câbles pour le parement Supérieur en cours de poussage.....	85
Tableau V.3: Calcul des câbles pour le parement inférieur en cours de poussage.....	86
Tableau V.4: Calcul des câbles pour le parement Supérieur en cours de poussage.....	87
Tableau V.5: Calcul des câbles pour le parement inférieur en cours de poussage.....	87
Tableau V.6: Vérifications des contraintes supérieures et inférieures sur appui et en travée, lors de construction de Tronçon 3	90
Tableau V.7: Vérification des contraintes supérieures et inférieures pour la section la plus tendue en construction.....	91
Tableau V.8: Calcul des câbles pour le parement Supérieur en service.....	97
Tableau V.9: Calcul des câbles pour le parement Inférieur en service.....	97
Tableau V.10: Calcul des câbles pour le parement Supérieur	97
Tableau V.11: Calcul des câbles pour le parement inférieur.....	97
Tableau V.12: Vérification des contraintes Supérieures et inférieures en phase de service pour les tronçons 1 et 3.....	99
Tableau V.13: Vérification des contraintes Supérieures et inférieures en phase de service pour le tronçon2.....	100
Tableau V.14: Pertes dues au frottement.....	102
Tableau V.15: Pertes dues au recul d'ancrage.....	104
Tableau V.16: Pertes dues au non simultanété des mises en tension.....	106
Tableau V.17: La somme des pertes instantanées.....	107
Tableau V.18: Pertes dues au Fluage du béton	110
Tableau V.19: Pertes dues à la relaxation des aciers.....	111
Tableau V.20: Les pertes totales des câbles extérieurs.....	112
Tableau V.21: Pertes dues au frottement.....	113
Tableau V.22: Les pertes dues au recul d'ancrage.....	114
Tableau V.23: Les pertes dues au non simultanété des mises en tension	116
Tableau V.24: La somme des pertes instantanées.....	117
Tableau V.25: Pertes dues au fluage du béton.....	119
Tableau V.26: Pertes dues à la relaxation des aciers.....	120
Tableau V.27: Pertes totales de poussage de Tronçon 3.....	121
Tableau V.28: Contraintes de cisaillement limites	123
Tableau V.29: Valeurs des contraintes de cisaillement à l'ELS	124
Tableau V.30: Valeurs des contraintes de cisaillement à l'ELU	124
Tableau VI.1: Les surcharges appliquées sur la poutre caisson	130
Tableau VI.2: Longueur déterminante pour l'étude transversale	131
Tableau VI.3: Combinaison de charges utilisées pour le calcul de sollicitations	133
Tableau VI.4: Sollicitations en flexion simple.....	137
Tableau VI.5: Sollicitations en flexion composée.....	137
Tableau VI.6: Section des aciers passifs pour les hourdis et le porte-à-faux.....	138

Tableau VI.7: Récapitulatif sur les sections des aciers passifs des hourdis et de porte-à-faux.....	139
Tableau VI.8: Section des aciers passifs pour les âmes	139
Tableau VI.9: Récapitulatif sur les sections des aciers passifs des âmes.....	139
Tableau VII.1: Les combinaisons de charge.....	142
Tableau VII.2: Réactions en chaque phase de poussage de tronçon 3.....	144

Liste des Figures

Figure I.1: Tracé en plan	19
Figure I.2: Profil en long.....	19
Figure I.3: Profil en travers.....	20
Figure I.4: L'emplacement de l'ouvrage	21
Figure I.5: Section transversale d'une pile.....	26
Figure I.6: Section longitudinale de la culée.....	27
Figure I.7: Appareil d'Appui de type (SIP)	27
Figure I.8: Principe de pont poussé des deux côtés	30
Figure I.9: Principe de pont poussé d'un seul côté.....	31
Figure II.1: Profil transversal adopté	34
Figure II.2: Section transversale à deux âmes	35
Figure II.3: Section transversale du caisson.....	37
Figure III.1: Eléments non structuraux	39
Figure III.2: Modèle de charge 71 et valeurs caractéristiques des charges verticales.....	40
Figure III.3: Modèle de charge 71 avec des charges verticales classifiées	40
Figure III.4: Répartition de la charge longitudinalement.....	41
Figure III.5: Répartition des charges transversalement	41
Figure III.6: Limites de la flèche sous le poids permanent	43
Figure IV.1: Variation du moment maximal sur appui	54
Figure IV.2: Variation du moment maximal en travée.....	55
Figure IV.3: Schéma statique phase 1	55
Figure IV.4: Schéma statique phase 2	56
Figure IV.5: Schéma statique phase 3	56
Figure IV.6: Schéma statique phase 4	56
Figure IV.7: Schéma statique phase 5	57
Figure IV.8: Schéma statique phase 6	57
Figure IV.9: Schéma statique phase 7	57
Figure IV.10: Schéma statique phase 8.....	58
Figure IV.11: Schéma statique phase 9.....	58
Figure IV.12.: Schéma statique phase 10	58
Figure IV.13: Schéma statique phase 11	59
Figure IV.14: Schéma statique phase 12	59
Figure IV.15: Schéma statique phase 13	59
Figure IV.16: Schéma statique phase 14	60
Figure IV.17: Schéma statique phase 15	60
Figure IV.18: Schéma statique phase 16	60
Figure IV.19: Schéma statique phase 17	61
Figure IV.20: Schéma statique phase 18	61
Figure IV.21: Schéma statique phase 19	61
Figure IV.22: Schéma statique phase 20	62
Figure IV.23: Schéma statique phase 21	62
Figure IV.24: Schéma statique phase 22	62
Figure IV.25: Schéma statique phase 23	63
Figure IV.26: Schéma statique phase 24	63

Figure IV.27: Schéma statique phase 25	63
Figure IV.28: Schéma statique phase 26	64
Figure IV.29: Schéma statique phase 27	64
Figure IV.30: Schéma statique phase 28	64
Figure IV.31: Schéma statique phase 29	65
Figure IV.32: Schéma statique phase 30	65
Figure IV.33: Schéma statique phase 31	65
Figure IV.34: Schéma statique phase 32	66
Figure IV.35: Effet d'une dénivellation sur culée	68
Figure IV.36: Effet d'une dénivellation sur le premier appui	68
Figure IV.37: Effet d'une dénivellation sur le deuxième appui	69
Figure IV.38: Effet d'une dénivellation sur l'appui intermédiaire	69
Figure IV.39: Vue en 3D du l'ouvrage sur le logiciel Robot Analysis	74
Figure IV.40: Diagramme du moment fléchissant sous charges permanentes	75
Figure IV.41: Diagramme du moment fléchissant sous combinaison E.L.U Fondamental	75
Figure IV.42: Diagramme du moment fléchissant sous combinaison E.L.S	76
Figure IV.43: Diagrammes des efforts tranchants sous charges permanente	76
Figure IV.44: Diagrammes des efforts tranchants sous la combinaison E.L.U Fondamental	77
Figure IV.45: Diagrammes des efforts tranchants sous la combinaison E.L.S	77
Figure V.1: Précontrainte de poussage	80
Figure V.2: Câblage de continuité extérieur	81
Figure V.3: L'allure des câbles de poussage	82
Figure V.4: Vérification des contraintes	88
Figure V.5: Tracé de câblage extérieur	93
Figure V.6: Effort d'un seul câble sur une travée de la structure	94
Figure V.7: Les moments dus à l'effet d'un seul câble de précontrainte	95
Figure V.8: Ferrailage de l'âme	125
Figure VI.1: Vue de dessus du voussoir (une bande de largeur 1m)	129
Figure VI.2: Modèle de charge UIC 71 corrigé	131
Figure VI.3: Répartition de la charge longitudinalement	132
Figure VI.4: Répartition des charges transversalement	132
Figure VI.5: Les efforts agissants sur la poutre caisson	133
Figure VI.6: Moment fléchissant sous la combinaison E.L.U fondamental	134
Figure VI.7: Moment fléchissant sous la combinaison E.L.S rare	134
Figure VI.8: Effort tranchant sous la combinaison E.L.U fondamental	135
Figure VI.9: Effort tranchant sous la combinaison E.L.S rare	135
Figure VI.10: Effort normal sous la combinaison sous E.L.U fondamental	136
Figure VI.11: Effort normal sous la combinaison E.L.S rare	136
Figure VII.1: Section verticale de la pile	141
Figure VII.2: Section transversale de la pile	142
Figure VII.3: Efforts horizontaux agissants sur la pile	143
Figure VII.4: Abaque de Walther N°149 pour une section circulaire	146
Figure VII.5: Ferrailage de la pile	147

Introduction Générale

Répondre à la demande de transport est l'une des préoccupations sociales et économiques de la capitale. A cet effet, l'Entreprise Métro d'Alger a entamé les travaux de réalisation des extensions du métro d'Alger. Le sujet qui nous a été proposé par cette dernière porte sur l'étude d'un pont rail hyperstatique poussé à caisson monocellulaire en béton précontraint par post tension.

Ce viaduc fait partie de l'extension C de la ligne 1 du Métro d'Alger, reliant les agglomérations Ain Nâadja et Baraki.

L'ouvrage présente une véritable originalité qui se distingue surtout par sa grandeur, avec un linéaire de 1464 m. Mais également par son tracé constitué de deux tronçons courbes poussés, et un tronçon droit réalisé sur place qui reliera les deux courbes.

Afin d'accorder une attention particulière aux principaux aspects caractérisant l'originalité de ce projet, nous commencerons par présenter l'ouvrage, son tracé, ses éléments constitutifs, les matériaux utilisés, ainsi une description générale du procédé de réalisation par poussage.

Puis nous passerons au pré-dimensionnement de la section transversale, et à l'estimation des charges et surcharges agissantes sur la structure en tenant compte du modèle de charge adéquat au Métro.

Ensuite, à l'aide du logiciel Robot Structural Analysis, nous déterminerons les diverses sollicitations en cours de poussage et en service.

Après avoir obtenu les efforts, nous traiterons la précontrainte, en abordant les procédés à utiliser, le calcul du nombre des câbles nécessaires en construction, en phase de service, leurs emplacements et leur tracé. Suivi, de la vérification des différentes contraintes.

Nous compléterons, par la suite, avec une étude de la section transversale, dont nous déterminerons la quantité des armatures passives nécessaires.

Enfin, nous achèverons ce travail avec une étude de la pile, ainsi qu'une synthèse des connaissances et des aptitudes acquises comme conclusion générale.

Chapitre I

Généralités

I.1. Introduction

Dans le cadre de l'élaboration du projet de mémoire de fin d'étude, l'Entreprise Métro d'Alger (EMA) nous a proposé un sujet qui porte sur l'étude d'un pont rail hyperstatique poussé à poutre caisson monocellulaire en béton précontraint par post tension reliant Ain Nâadja et Baraki.

I.2. Présentation de Projet

Ce projet représente L'extension du métro d'Alger allant de Ain Nâadja à Baraki, qui s'étend sur une longueur de 6,16 km de parcours avec un rayon minimal de 350 m et un maximal de 5500 m.

Le tracé du tronçon s'effectue au moyen d'un tunnel NMA (Nouvelle méthode autrichienne). Une fois le parcours du tunnel sous l'Avenue Mohamed Boudiaf est fini, un viaduc de sortie d'Ain Nâadja est projeté, ce à quoi nous intéresserons dans cette étude.

I.3. Présentation de l'ouvrage

Le viaduc est situé entre les PK 1+789.000 et 3+253.000 ayant une longueur de 1464.00 m, distribué sur 35 travées et passe au-dessus de la Ligne Ferroviaire SNTF, la Route Nationale N38 et l'Oued El Harrach.

Le tracé du viaduc, comporte deux stations aériennes. La Station Ain Nâadja Gare située sur le pk 1+887.50, et la Station Future Parc Urbain située sur le pk 2+587.00.

Le tracé est composé de trois tronçons

Tronçon 1 : situé entre la culée C-1 et la pile P-23, avec une longueur de 918.00m, deux stations aériennes sont projetées sur ce premier tronçon. Il est constitué par une courbe en plan avec 1500.00m de rayon et une pente longitudinale du tronçon est 0.0%.

Tronçon 2 : est un tronçon de transition avec 166.50 m de longueur entre la pile P-23 et la pile P-27. Il est impossible de pousser cette partie de viaduc avec ces caractéristiques de tracé (clothoïde + une droite + un clothoïde), d'où il est nécessaire de l'exécuté sur place.

Tronçon 3 : ce dernier se situe entre la pile P-27 et la culée C-2, avec une longueur de 379.50 m. Il s'agit d'une courbe en plan avec un rayon de 1195.00m. La pente longitudinale est constante et égale à 4%.

En raison des approches constructives on a choisi la typologie correspondante à un pont poussé à partir de deux culées.

I.4. Les données fonctionnelles

Les données fonctionnelles représentent l'emplacement, les caractéristiques géométriques de l'ouvrage.

I.4.1.1. Tracé en plan

Le tracé est formé par deux courbes de rayon (1500 m, 1195 m respectivement) reliées par un tronçon de transition rectiligne de 166.5 m de longueur.

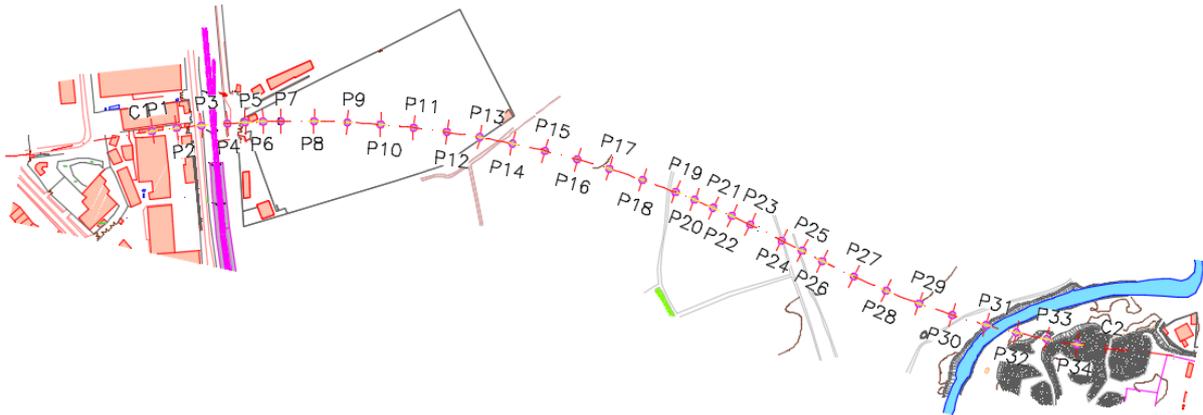


Figure I.1: Tracé en plan

I.4.2. Profil en long

Le viaduc présente une longueur de 1464 m, supporté par deux culées et 34 piles.

Le profil longitudinal est composé de trois tronçons, dont le premier et deuxième ont une pente de 0.00 %, par contre le troisième a une pente constante de 4 %.

Le viaduc doit respecter un gabarit vertical de 13.00 m quand il croise la ligne de chemin de fer existante.



Figure I.2: Profil en long

1.4.3. Profil en travers

Le profil transversal de l'ouvrage est constitué d'une plateforme ferroviaire à deux voies avec une largeur de 6.7m, deux éléments préfabriqués pour constituer les cheminements de secours de chaque côté d'une largeur de 1.1 m, ainsi que des arêtes latérales de 0.25 m chacune.

Ce qui fait que la largeur occupée par le tablier est de 9.4 m.

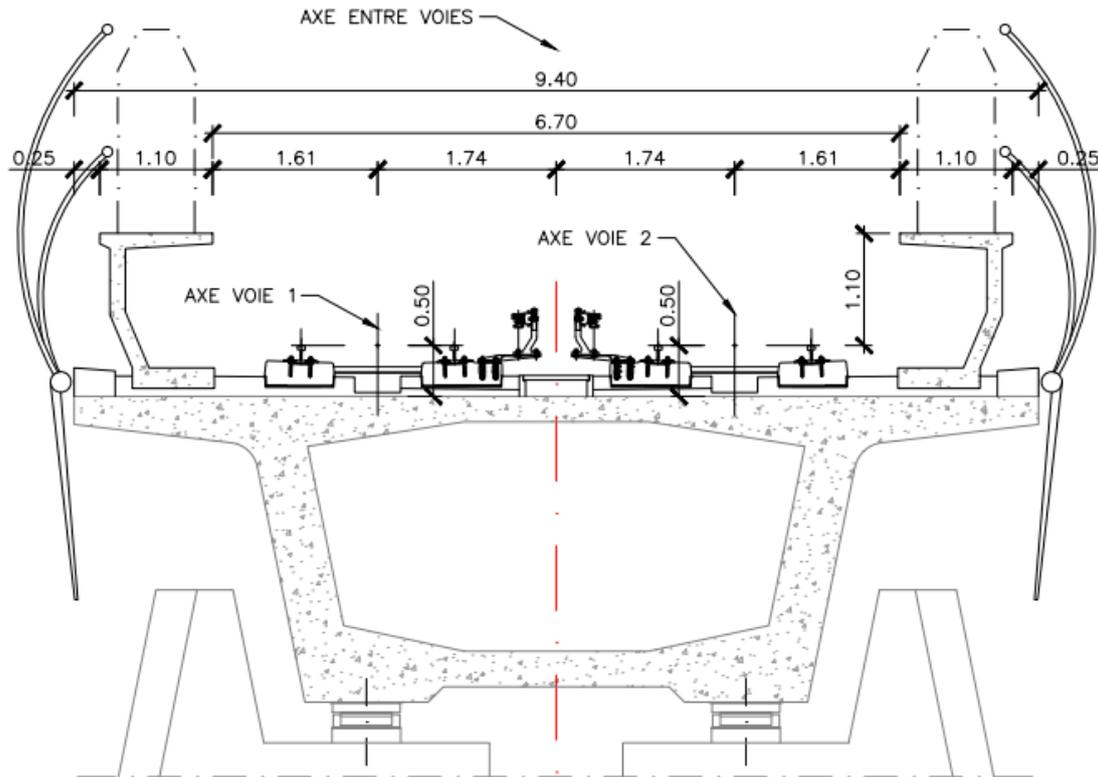


Figure I.3: Profil en travers

1.5. Les Données naturelles

1.5.1. Topographie

L'ouvrage relie la station Mohamed Boudiaf à la station Mohamed Belarbi d'un linéaire 1464.00 m et traverse en hauteur la ligne ferroviaire de la SNTF, la Route Nationale N°38 et Oued El Harrach.

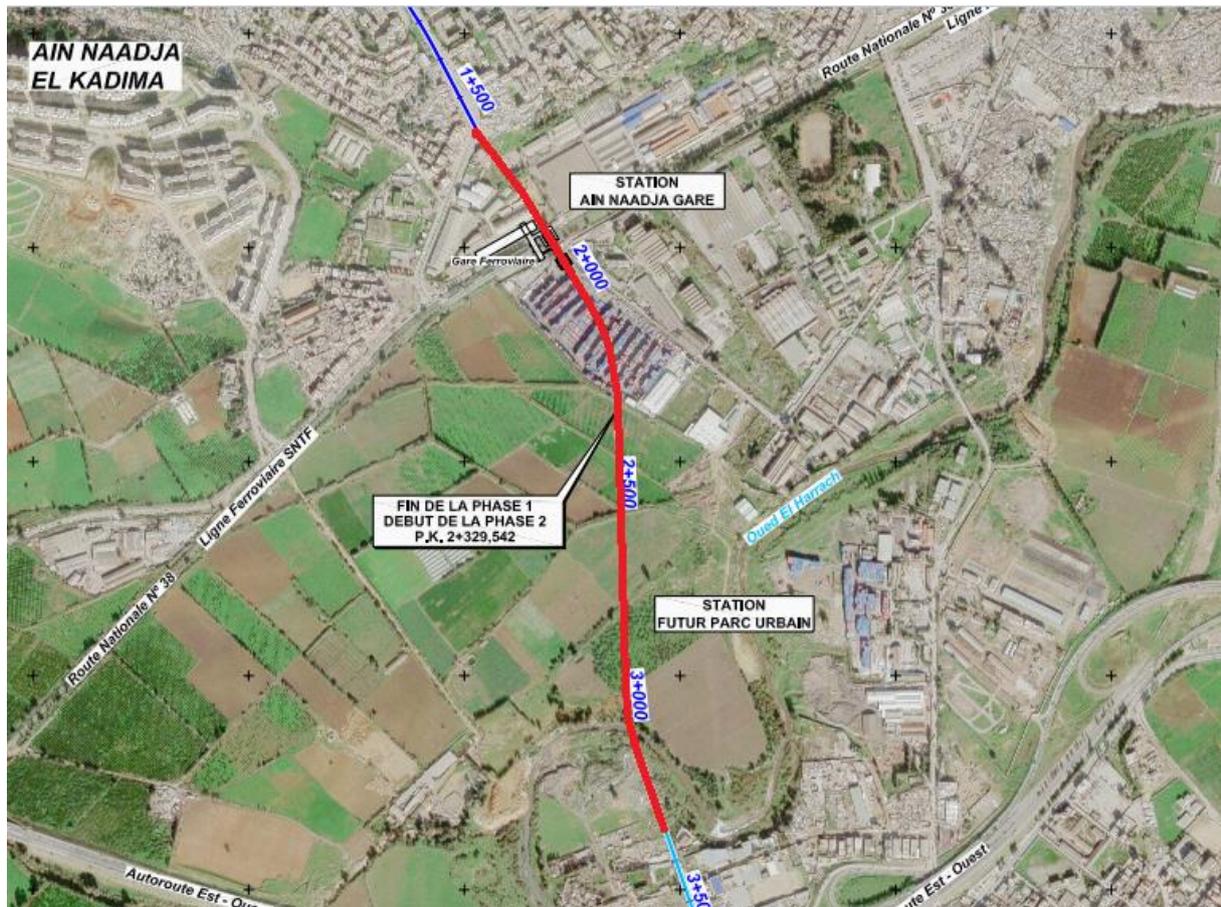


Figure I.4: L'emplacement de l'ouvrage

1.5.2. La reconnaissance géotechnique

La campagne géotechnique réalisée se concentre sur la détermination des caractéristiques lithologiques et géotechniques des matériaux traversés par le tracé afin de réaliser une conception appropriée du métro du point de vue géologique et géotechnique. Elle est composée par les types de reconnaissances suivants :

- Sondages carottés (dénommés S), avec l'installation des piézomètres à l'intérieur.
- Sondages pressiométriques (dénommés SP).
- Essais en laboratoires

a. Sondage Carotté

Les sondages permettent d'avoir des observations précises et continues sur les sols et les roches qui constituent le sous-sol tout le long du tracé, et à prélever des échantillons non remaniés dont le diamètre sera au minimum de 85 mm.

b. Sondages préssiométrique

Des sondages préssiométrique ont été réalisés en plus de sondages carottés. Ils ont été menés conformément à la norme NF P 94-110-1 de juillet 1991. Il s'agit d'un essai de chargement statique du terrain en place, effectué par une sonde cylindrique dilatable radialement, introduite dans un forage, d'un diamètre extérieur de 80 mm.

c. Essais en laboratoire

Sur une sélection représentative des échantillons obtenus lors des sondages, on effectuera des essais en laboratoire pour les classer, par la suite déterminer leur état (granulométries, limites d'Atterberg, humidité, densité, agressivité, etc.), ainsi que obtenir les paramètres de résistance et de déformabilité.

Tableau I.1: Essais de laboratoire sur échantillons de sondages

N°	ESSAI DE LABORATOIRE	QUANTITÉ		
		Ain Naadja-Port Sec	Port Sec-Baraki	
1	Analyse Granulométrique par Tamisage	41	57	
2	Limites d'Atterberg	47	45	
3	Teneur en Eau Naturelle	46	45	
4	Densité sèche et humide	46	45	
5	Résistance a la compression uniaxiale	8	2	
6	Essai de cisaillement rectiligne CD	2	0	
7	Essai de Compression Triaxial au système CD	0	0	
8	Mesure de Gonflement à l'oedomètre	0	0	
9	Pression de gonflage	2	2	
10	Analyse chimique du sol	Sulfates	5	1
		Sels solubles	7	3
		Carbonates	7	3
		Matière organique	2	0
11	Analyse chimique de l'Eau	0	1	

d. Description géotechnique du tracé

Le tracé traverse, fondamentalement, des sols quaternaires et plio-quaternaires constitués par de l'argile limoneuse jaunâtre avec concrétions carbonatées grisâtres. Il s'agit des Marnes jaunes du Harrach. Elles disparaissent uniquement dans la zone agricole, où les sols alluviaux couvrent le substrat. Ce substrat est constitué par des sols tertiaires argileux et sablonneux, appartenant à la Molasse Astienne.

Dans la zone d'Ain Nâadja, les Marnes de l'El Harrach sont couvertes par un niveau formé d'argile rouge, entre lesquels on intercale des couches sablonneuses aléatoirement, sans continuité latérale

Au niveau de la liaison entre Ain Nâadja et la zone agricole (sondage S-22), il existe une faille qui a provoqué la diminution de la vallée du Harrach, rempli par des sols alluviaux de nature argileuse et granulaire, d'épaisseur variable. De même, la campagne géotechnique réalisée détecte une autre zone de faille aux alentours du sondage carotte S-21.

Au long de presque tout le tracé, on a détecté un recouvrement de remblais anthropiques appartenant à l'exécution de voies dans les zones urbanisées, terrain de travaux dans des zones agricoles ou matérielles de déchets de l'exécution d'œuvres proches.

Nous pouvons distinguer les Unités Géotechniques suivantes :

Tableau I.2: Classification des sols présents sur le site

UNITE GEOLOGIQUE-GEOTECHNIQUE		TYPE DE SOL	CATÉGORIE
Dépôts de construction compactées	R	Très meuble	S4
Argile vaseuse (Alluvial)	AA	Très meuble	S4
Sable	AS	Très meuble	S4
Argile limoneuse très raide - dure	QA	Meuble	S3
Sable argileux compact à très dense	QS	Meuble	S3
Argile limoneuse jaunâtre carbonaté dure	QM	Meuble/Ferme	S3
Sable limon-argileux légèrement graveleux compact à très dense	TS	Ferme	S2
Marne dure	TA	Ferme	S2

Tableau I.3: Résumé des paramètres géotechniques 1

UNITE		N_{30}	<0,08 (%)	LL (%)	IP (%)	DENSITE HUM (kN/m ³)	Cu (kN/m ²)
Dépôts anthropiques	R	9 (4-18)	48	-	-	19,0	-
Argile vaseuse ferme-raide	AA	11 (0-30)	87	49	21	20,0	50
Sable limoneuse lâche	AS	8 (1-23)	29	-	-	21,0	-
Argile limoneuse très raide	QA	29 (8-100)	86	47	20	20,6	120
Sable argileuse-limoneuse très dense	QS/QG	>50 (10-100)	21	38	16	22,9	-
Argile limoneuse carbonaté dure à Marne jaunâtre carbonaté dure	QM	44 (11-100)	86	54	25	20,6	175

Tableau I.4: Résumé des paramètres géotechniques 2

UNITE		C' (kN/m ²)	Φ' (°)	E' (MN/m ²)	ν'	Eur (MN/m ²)	EP (MN/m ²)
Dépôts anthropiques	R	5	28	6	0,3	24	2
Argile vaseuse ferme-raide	AA	20	25	10	0,3	30	4
Sable limoneuse lâche	AS	10	29	8	0,3	24	5
Argile limoneuse très raide	QA	30	28	15	0,3	45	13
Sable argileuse-limoneuse très dense	QS/QG	10	33	35	0,3	105	16
Argile limoneuse carbonaté dure à Marne jaunâtre carbonaté dure	QM	40	27	35	0,3	105	17

Avec :

N30 : valeur N30 de S.P.T (Standard Penetration Test).

<0.08 (%) : le pourcentage en fraction de diamètre inférieur à 0,08 mm.

LL : limite liquide.

IP : indice de plasticité.

Cu : résistance au cisaillement non drainé.

C' : cohésion drainé.

Φ' : angle de frottement interne drainé (angle de friction du sol).

E' : module de déformation drainé.

V : Coefficient de Poisson drainé

Eur : module de déformation recharge/déchargement.

EP : module pressiométrique.

I.6. Actions susceptibles de solliciter l'ouvrage

I.6.1. Actions thermiques

La composante de température uniforme dépend de la température effective maximale et minimale du pont, qui peut être atteinte dans un intervalle de temps prescrit. Cela conduit à une étendue de variables uniforme de température qui dans une structure libre se manifesterait par la variation de la longueur de l'élément.

I.6.2. Actions dues au vent

La charge de vent est de 2.00 kN/m², appliquée aux surfaces exposées. Pour le cas du tablier, on a considéré une surface exposée de 4.00m de haut (en considérant 0.8 m de chemin de service)

Et on assimile le matériel roulant du chemin de fer à un écran roulant de 3 m de hauteur.

I.6.3. Actions sismiques

L'action sismique sera évaluée en accord avec la norme RPOA 2008 (Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art), complétée par les Eurocodes.

Conditions générales :

- Zone sismique d'Alger : Zone III
- Groupe d'élément de construction : Groupe 1 Pont stratégique
- Classification de site : S4
- Coefficient d'accélération de zone : A = 0,40

I.7. Les éléments de l'ouvrage

I.7.1. Les piles

Les piles ont le rôle de transmettre les charges au sol. Leur choix et leur distribution dépend de plusieurs paramètres, voire la topographie et la géologie du site, l'urbanisation ainsi l'étude technico-économique.

La section des piles P-1, P-2, P-8 à P-18, P-24 à P-30 sera rectangulaire tandis que pour les piles P-31 à P-34 elle sera circulaire

La fondation des piles type se compose d'une semelle sur pieux.

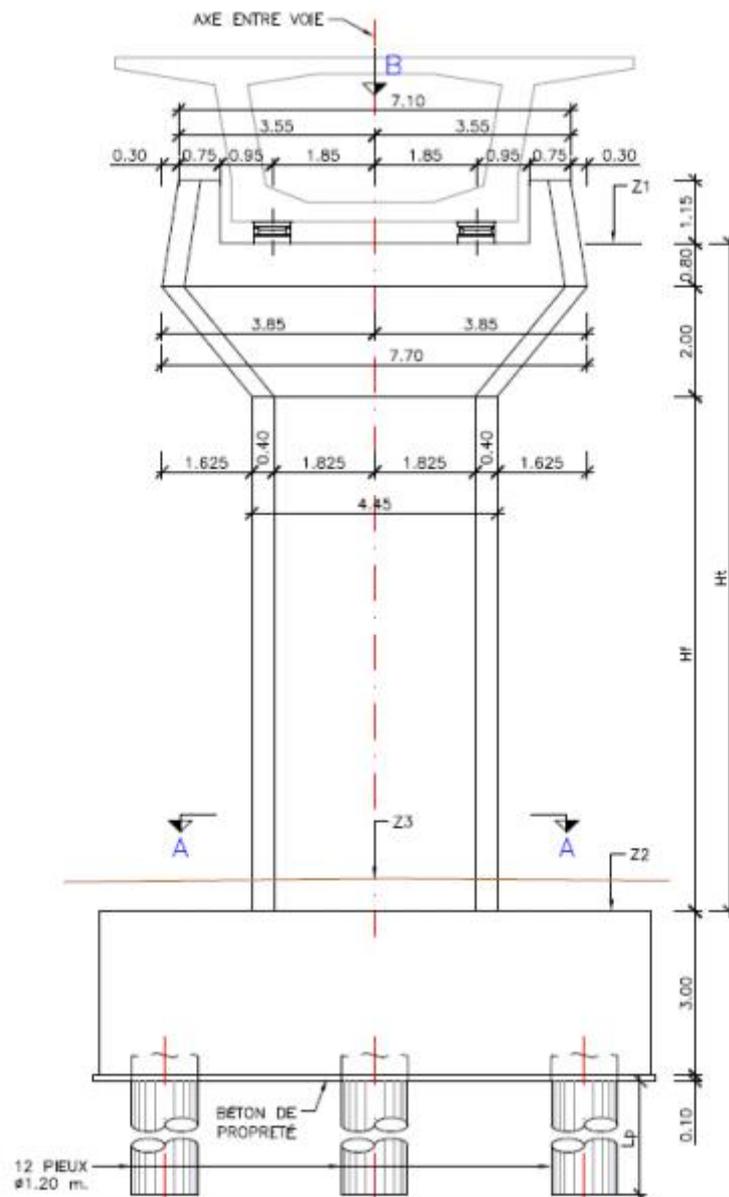


Figure I.5: Section transversale d'une pile

1.7.2. Les culées

Les culées seront construites sous forme de caissons de béton armé, constituées par deux contreforts intérieurs. Les murs latéraux serviront d'ancrage aux amortisseurs qui joignent le tablier avec les culées.

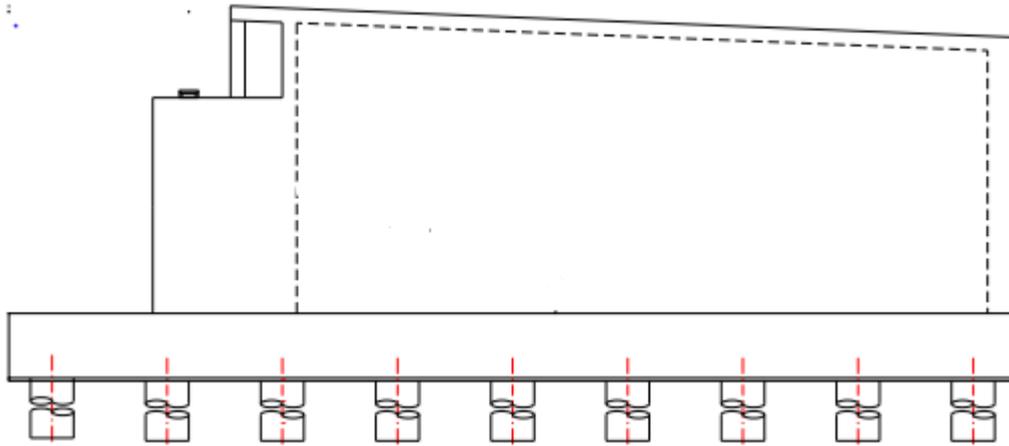


Figure I.6: Section longitudinale de la culée

I.7.3. Les appareils d'appui

Le tablier du viaduc sera soutenu sur les piles par des appareils d'appui de type : "Sliding Isolation Pendulum isolator with Re-Centring (SIP)". On disposera deux appareils de ce type pour chaque pile. Ces appareils ont la capacité de faire revenir le tablier à sa position initiale, après un déplacement dû à des charges horizontales (vent, freinage, séisme).

De plus ils ont une certaine capacité d'amortissement, ce qui aide les amortisseurs disposés dans les culées. Les appareils d'appui ne seront pas mis en place sous le tablier qu'à la fin de la construction complète du viaduc. Lors du poussage et de la mise en tension de la précontrainte extérieure, le tablier sera soutenu par des appuis provisoires.

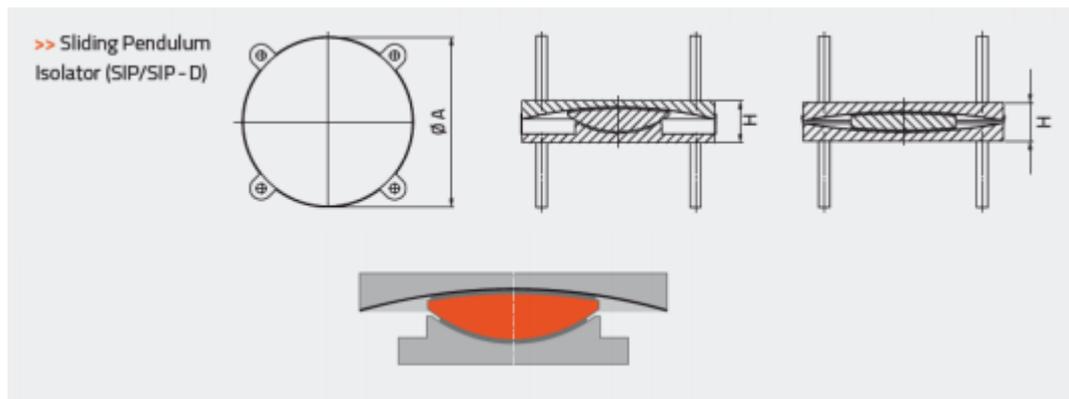


Figure I.7: Appareil d'Appui de type (SIP)

1.7.4. Chemin de fer

Les rails font partie des éléments non structuraux. Ils supportent et guident les roues de matériel roulant, en recevant directement les efforts verticaux, transversaux et longitudinaux qui s'exercent sur la voie.

Les traverses servent à maintenir les rails à l'écartement normal et de répartir la charge que les rails reçoivent des essieux sur une étendue suffisante de ballast pour ne pas dépasser une certaine charge unitaire.

Dans le cadre de ce projet on n'aura pas besoin de ballast, les traverses seront posées directement sur une plateforme de béton.

- Rails de voie (2 x 1,2) : 2,4 kN/ml.
- Rails et sommier (2 x 1,75) : 3.5 kN/ml.
- Béton plateforme : 30 kN/ml.
- Traverses (2 x 3,2 /0,6) : 10,7 kN/ml.

1.8. Matériaux de construction

1.8.1. Béton

Dans le cas de ce projet, la résistance du béton en compression à 28 j dépend de l'élément à réaliser :

- Classe C30/37 pour les Pieux, piliers et culées
- Classe C40/50 pour le Tablier
- Classe C12/15 pour Béton de masse, régularisation et nettoyage.

1.8.2. Acier

a. Aciers passifs

- Fe E 500 armatures passives de haute ductilité
- Fe E 500 maille électro soudée.
- S 355 Acier en profils métalliques

b. Aciers Actifs

La précontrainte utilisée pour le tablier du viaduc sera de deux types :

- Précontrainte à l'intérieur des houris. Cette précontrainte est centrée et sera utilisée en cours de poussage.
- Précontrainte extérieure, qui servira à reprendre les efforts en service.

Les torons qui seront utilisés dans les deux types de précontrainte, auront les caractéristiques techniques suivantes:

- Torons constitués de 7 fils (0.6")
- Acier ASTM A 416 Qualité 270
- Limite élastique : 1670 N/mm²
- Limite de rupture : 1860 N/mm²
- Diamètre nominal : 15.24 mm
- Section nominale : 140.00 mm²

Les câbles auront les caractéristiques suivantes :

- Câbles constitués de 12 ou 15 torons : T12Ø0.6" ou T15Ø0.6"
- Gaines standards Ø85mm ou Ø95mm
- Les câbles seront précontraints jusqu'à 70 % de sa limite de rupture :

T12Ø0.6" → 2187 kN

T15Ø0.6" → 2734 kN

I.9. Historique des ponts poussés

Le lançage, ou poussage des tabliers consiste à construire l'ouvrage sur le rebord du plateau, derrière la culée et à pousser au fur et à mesure le tablier du viaduc sur les piles. Cette technique est utilisée depuis le 19^{ème} siècle. Ce n'est qu'à partir des années 1960 que les principes de bases des procédés de poussage tels qu'ils sont connus aujourd'hui ont été appliqués sur un pont en béton précontraint. Au départ le poussage ne s'appliquait qu'aux constructions métalliques de faibles portées. Cette technique n'a pu se développer que grâce à la mise au point de plaques d'appui provisoires revêtues de *Téflon* ou de produits similaires, permettant le glissement avec un faible frottement d'une part, et d'autre part la mise au point de la précontrainte, qui a permis l'allégement des structures, l'amélioration de leur ductilité et l'adaptation de leur fonctionnement à des phases provisoires.

I.9.1. Principes généraux du poussage

Le principe général de la méthode consiste à pré-fabriquer le tablier à côté de la brèche à franchir, en arrière de la culée, puis à le pousser, par un déplacement de translation suivant son axe, en le faisant glisser sur les piles jusqu'à ce qu'il ait atteint sa position définitive, au-dessus de la brèche qu'il doit enjambrer.

I.9.2. Types des ponts poussés

On peut distinguer deux types de pont poussé, correspondant à des conceptions relativement différentes :

I.9.2.1. Ponts poussés bilatéralement

Les ponts en béton précontraint à trois travées mis en place par poussage bilatéral sans palées provisoires couvrent une gamme de portées déterminantes couramment comprises entre 30 et 60 m. Chaque moitié de l'ouvrage, analogue à un fléau de pont construit en encorbellement, est construite à l'arrière des culées, puis poussé : les demi-fléaux « avant », s'intègrent en phase définitive dans la travée centrale, sont ainsi amenés à enjamber, pendant le poussage, la travée de rive correspondante.

C'est pourquoi la longueur L de la travée centrale est sensiblement égale au double de celle des travées de rive. La continuité du tablier est réalisée par bétonnage en place d'un « voussoir » de clavage, au milieu de la travée centrale, puis par mise en tension des câbles de continuité.

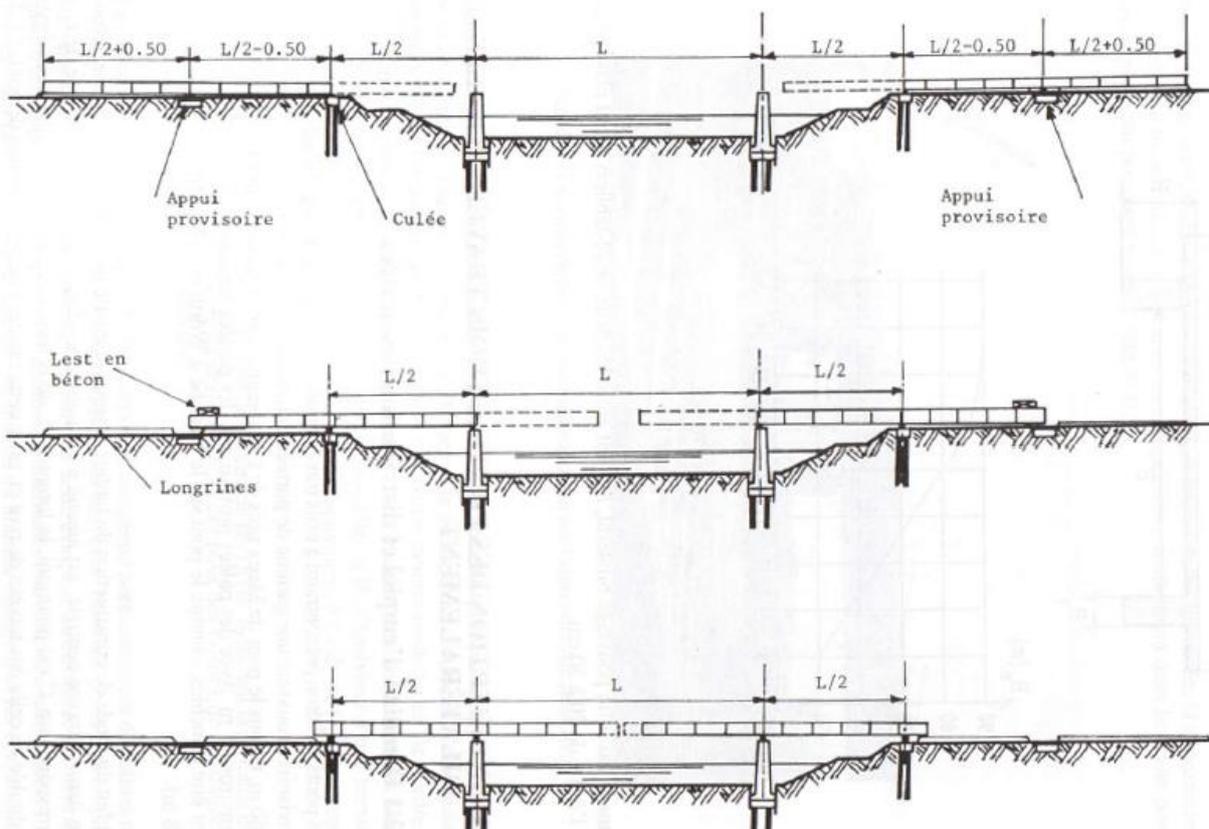


Figure I.8: Principe de pont poussé des deux côtés [1]

I.9.2.2. Ponts poussés unilatéralement

Le tablier des ponts mis en place par poussage unilatéral est construit par tronçons successifs, de longueur constante ou variable, dans un atelier fixe situé en arrière d'une culée, et dans le prolongement de l'ouvrage. Dès que le béton d'un nouveau tronçon a atteint un niveau de durcissement suffisant, l'ensemble du tablier est déplacé par une translation longitudinale égale à la longueur du tronçon, puis, sur l'atelier ainsi dégagé, un autre est construit, et ainsi de suite jusqu'à l'achèvement de l'ouvrage.

Les portées de l'ouvrage doivent remplir des conditions relativement restrictives : pour d'évidentes raisons d'économie (répétitivité de la géométrie et du câblage des tronçons) elles ne doivent pas être très inégales ni dépasser 60 mètres dans les cas courants. Dans la pratique, on s'efforce de donner aux travées intermédiaires de même portée. Les travées de rives doivent être, si possible, plus courtes que les travées courantes, car, pendant le poussage, elles sont le siège de sollicitations importantes.

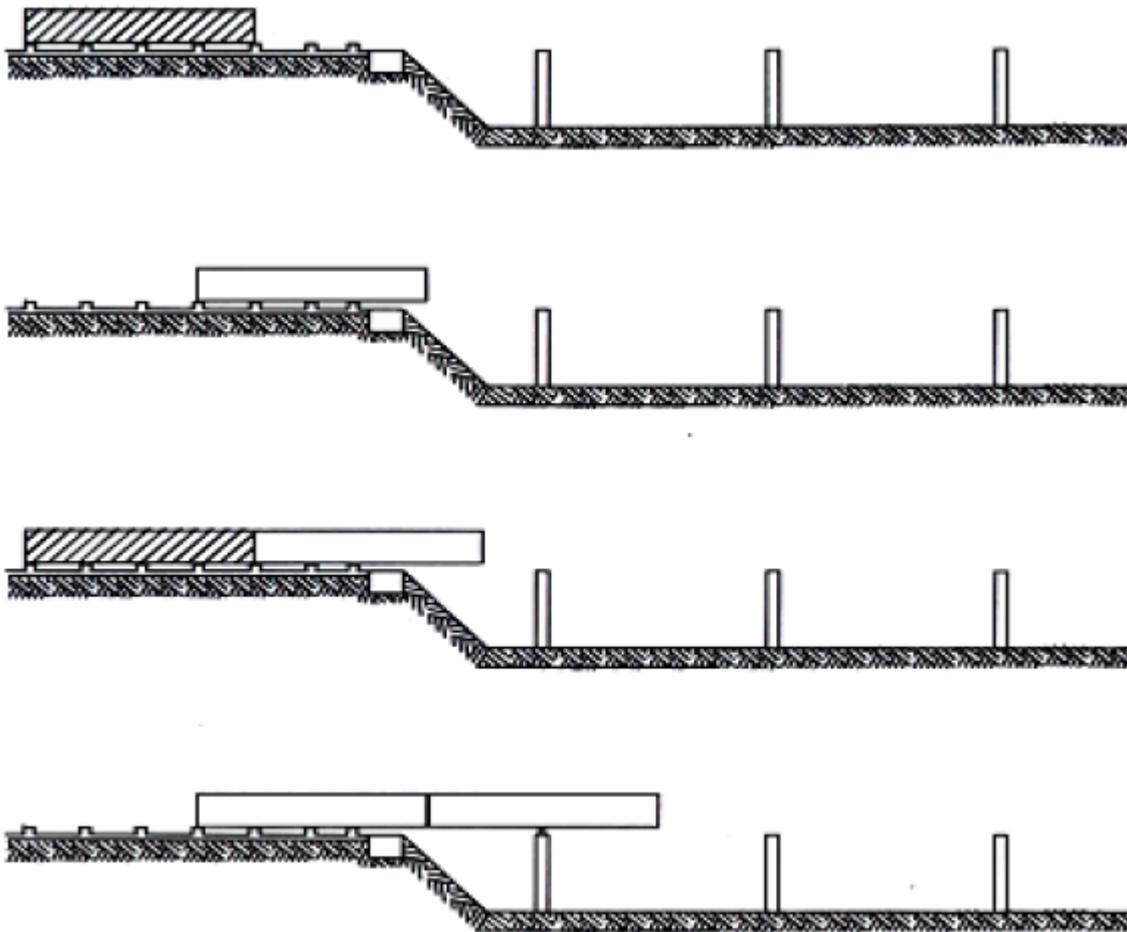


Figure 1.9: Principe de pont poussé d'un seul côté [1]

I.9.3. Avantages et conditions du procédé

La méthode de poussage présente plusieurs avantages :

- La sécurité du personnel du chantier et les usagers extérieurs au chantier, qui se trouvent sous l'ouvrage.
- Une meilleure organisation de travail.
- Grâce à la technique de lançage, la réalisation des ponts dont la hauteur est plus ou moins importante est sans difficulté.
- Les opérations sur la mise en tension des câbles de précontrainte sont beaucoup plus faciles que sur un échafaudage.
- L'absence d'étalement, de support de coffrage ou de charpente quelle qu'elle soit, dans la brèche à franchir, ce qui permet d'assurer un total respect des gabarits dans les zones survolées.
- Un matériel spécifique peu coûteux, facile à transporter, à monter et à démonter, simple à utiliser et facilement adaptable pour être réutilisé sur d'autres ouvrages.
- Une grande rapidité d'exécution qui permet d'obtenir des délais de réalisation courts.

En revanche un certain nombre de conditions doit être satisfait pour l'application de la méthode de poussage.

- le tablier doit être de hauteur constante.
- l'intrados ne doit pas subir de contrainte lors de son poussage.
- disposé suffisamment d'espace pour l'installation de l'aire de préfabrication à l'arrière des culés.
- Si le tracé est courbe, le rayon de courbure doit être constant avec une pente constante.

I.10. Conclusion

Dans ce présent chapitre on a décrit d'une façon générale l'ouvrage et les éléments constitutif, ainsi que les matériaux qu'on va utiliser pour la construction (béton, acier, précontrainte). Le pré-dimensionnement de la section transversale est traité dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Pré-dimensionnement de la section transversale

II.1. Introduction

La section caisson présente une grande rigidité à la torsion, lors des constructions d'ouvrage par rapport aux autres types de sections, grâce à sa forme tubulaire.

II.2. Largeur total du hourdis B

B : la largeur du voussoir obtenue en fonction du profil en travers choisi.

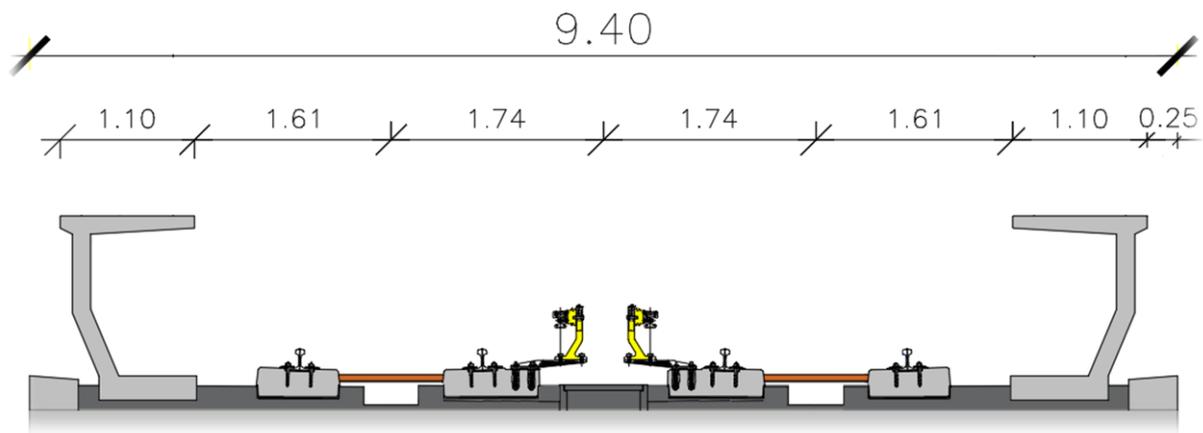


Figure II.1: Profil transversal adopté

Le profil transversal comprend :

- Une plateforme ferroviaire d'une largeur de 6,7m (en prenant compte de la largeur des véhicules roulants)
- Un Cheminement de secours de chaque côté avec une largeur de 1,1 m.
- Fixation du dispositif de sécurité, qui occupe une distance de 0,25 m

Ce qui fait que la largeur du tablier est de l'ordre de 9,4 m

$$B = 6.7 + 2 \times 1,1 + 2 \times 0,25 = 9,4 \text{ m}$$

Choix du type de caisson

Le choix de type de caisson dépend de la largeur du tablier [12]

- $B < 15 \text{ m}$ → mono-caisson simple à deux âmes.
- $15 \leq B \leq 20 \text{ m}$ → mono-caisson à 3 âmes.
- $B > 20 \text{ m}$ → Bi-caisson.

Dans notre cas : $B = 9.4 \rightarrow B < 15 \text{ m} \rightarrow \text{mono-caisson à deux âmes}$

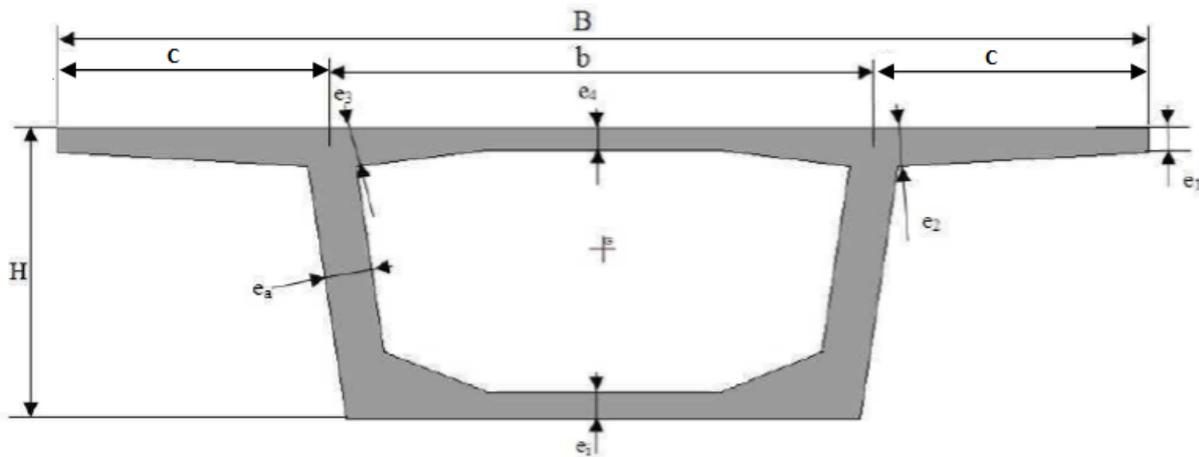


Figure II.2: Section transversale à deux âmes

II.3. Epaisseur du hourdis supérieur

L'épaisseur du hourdis supérieur est essentiellement conditionnée par sa résistance à la flexion transversale et aux charges concentrées et par la possibilité de placer des câbles de précontrainte longitudinaux (câbles de poussage).

Elle vaut généralement 30 cm dans le cas des ponts ferroviaires. [1]

On prend l'épaisseur égale $e_s = 30 \text{ cm}$

II.4. L'épaisseur des âmes

L'épaisseur des âmes est conditionnée à la fois par le type de câblage adopté et par les conditions de résistance à l'effort tranchant.

Dans les ponts rails, l'épaisseur courante des âmes est égale à 50cm pour des portées usuelles comprise entre 40 et 50 m. [1]

$e_a = 50 \text{ cm}$

II.5. La hauteur du caisson

Dans ce cas la hauteur h_p (hauteur de voussoir sur pile) égale à h (hauteur de voussoir courant), car c'est un pont poussé et tous les voussoirs se retrouvent à un moment donné sur pile pendant le poussage.

L'élancement du tablier, est égal au rapport de sa portée déterminante L (travée principale) à sa hauteur H , et compris entre 15 à 16 dans le cas d'un pont-rail. [1]

$$\frac{1}{15} < \frac{H}{L} < \frac{1}{16}$$

Ce qui va nous donner une hauteur H comprise $3.18 < h < 3.4$

On prendra **$h = 3.2 \text{ m}$**

L : représente la longueur de la travée principale, dans notre cas ($L=51$)

II.6. Longueur d'encorbellement

$$C = \frac{B-b}{2} = \frac{9.4-5.4}{2} = 2m$$

b : représente la distance entre les axes des deux âmes au niveau de l'hourdis supérieure. Elle est équivalente à la distance sur laquelle se répartit les charges transversalement sous les traverses.

II.7. L'épaisseur de l'hourdis supérieur

Cette épaisseur dépend de la barrière de sécurité utilisée. Pour notre ouvrage on utilise les barrières de type (BN4). [12]

L'épaisseur est comprise $16 < e_1 < 24$

On prend : **$e_1 = 24 \text{ cm}$**

II.8. L'épaisseur du hourdis inférieur

L'épaisseur du hourdis inférieur dépend de plusieurs paramètres, on peut citer : [1]

- L'intensité des efforts de compression en phase de construction ou de service.
- Le logement des câbles de continuités.
- La poussée au vide due à ces câbles.
- L'ancrage de ces câbles et la diffusion des efforts de précontrainte.

L'épaisseur inférieure est comprise $30 < e_i < 60$

On prend : **$e_1 = 30 \text{ cm}$**

II.9. L'enracinement de l'encorbellement

L'épaisseur e_2 est comprise $\frac{C}{8} < e_2 < \frac{C}{7}$ [1] avec $C = 2m$

$$0.3 < e_2 < 0.35$$

On prend : **$e_2 = 0.35 \text{ m}$**

II.10. L'épaisseur à l'encastrement

On a : $e_3 = 0.1 + \frac{b}{25} = 0.1 + \frac{5.4}{25} = 0.316m$ [1]

On prend : **$e_3 = 0.35 \text{ m}$**

II.11. La largeur de la base

Les âmes présentent une grande facilité en termes de coffrage et de décoffrage lorsqu'elles sont inclinées. L'inclinaison couramment adoptée est comprise entre 10 et 30 %. [12]

On prend l'inclinaison de 20 %

On trouve $b = 4.62 \text{ m}$

II.12. Caractéristiques de la section

Les caractéristiques géométriques de la section transversale sont tirées à partir du logiciel **Autocad**.

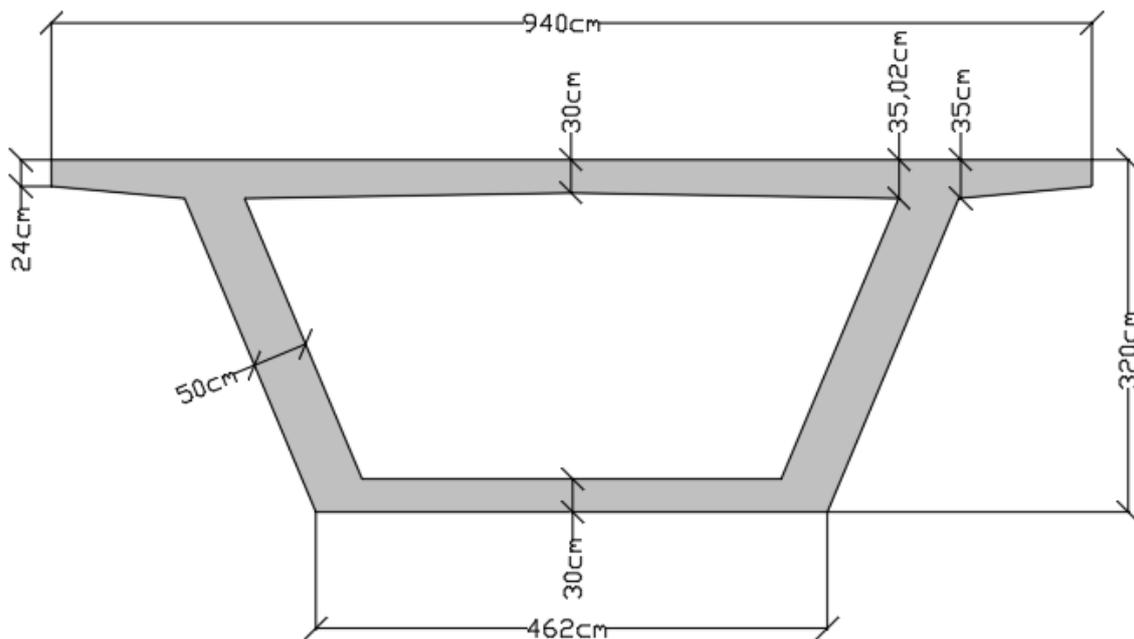


Figure II.3: Section transversale du caisson

La surface : $A = 7.196 \text{ m}^2$

Les moments d'inertie par rapport aux axes qui passent par le centre de gravité :

$$I_x = 10.08 \text{ m}^4$$

$$I_y = 44.62 \text{ m}^4$$

II.13. Conclusion

Le pré-dimensionnement de la section transversale est une étape capitale pour l'étude d'un tablier, ça revient à dimensionner les différents éléments constitutifs d'un caisson monocellulaire courant, en tenant compte de plusieurs facteurs (portée, diamètre des câbles de précontrainte...), afin de reprendre les charges qui seront définies dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Estimation des charges et des surcharges

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on va estimer les charges et les surcharges qui s'appliqueront sur notre ouvrage. A savoir, les charges permanentes, d'exploitations ou climatiques en phase de construction et en phase de service sous différentes combinaisons.

III.2. Charges hors trafic

III.2.1. Poids propre des éléments structuraux

- Les voussoirs

$$P_v = A_v \cdot \rho = 7.196 \times 25 = 179.9 \text{ kN/m}$$

P_v : Poids propre de voussoir

A_v : Section du voussoir

ρ : Masse volumique du béton.

III.2.2. Poids propre des éléments non structuraux

- 1 Élément préfabriqué : sert comme chemin de secours avec une charge de 25 kN/m.
- 2 Plateforme en béton : utilisée à la place de ballast, ayant une charge de 30 kN/m
- 3 Arête latérale : sert à fixer les barrières de sécurité, ayant une charge 10 kN/m.
- 4 Traverses et Rails de voie : 15 kN/m. 5

Qui donnent un poids total de 80 kN/m

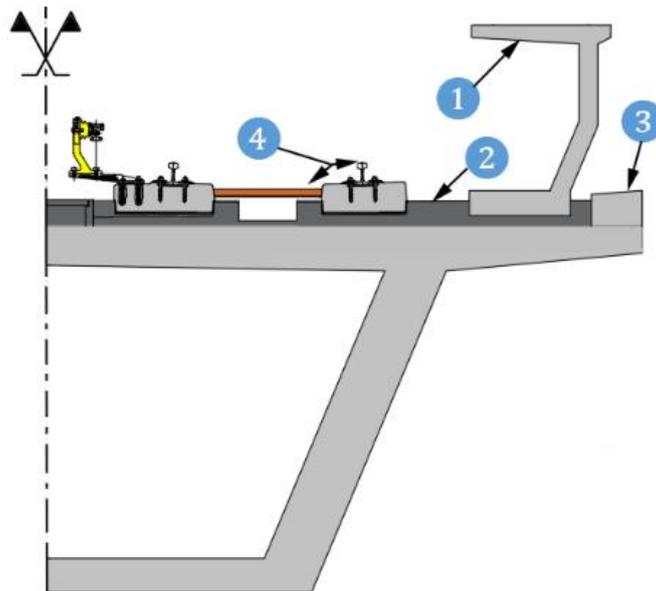


Figure III.1: Eléments non structuraux

III.3. Charges dues au trafic

III.3.1. Les charges verticales

Le modèle de charge UIC 71 représente l'effet statique d'un trafic ferroviaire normal. Il représente la charge verticale sur la voie.

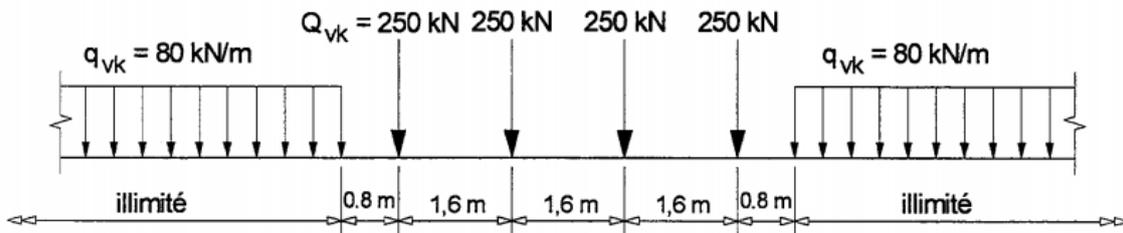


Figure III.2: Modèle de charge 71 et valeurs caractéristiques des charges verticales [3]

Notre trafic ferroviaire (Métro) est plus léger que le trafic normal, pour cela les valeurs caractéristiques de la figure doivent être multipliées par un coefficient α , dépendant du type de projet. Lorsqu'elles sont multipliées par le coefficient α , les charges sont appelées "charges verticales classifiées". [3]

L'entreprise de Métro d'Alger préconise la valeur du coefficient $\alpha = 0,91$

D'où on a le schéma de charges suivant :

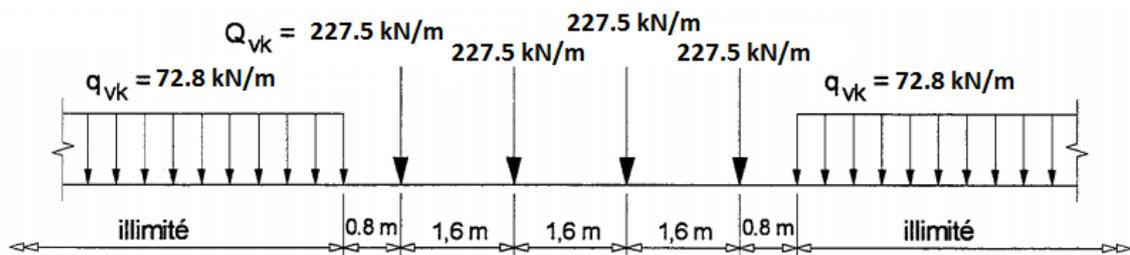


Figure III.3: Modèle de charge 71 avec des charges verticales classifiées

III.3.1.1. La transmission des charges

L'ouvrage reçoit des charges Verticales q , réparties par moitié sur chacun des rails Longitudinalement. La charge supportée par un seul rail se répartit comme indiqué dans la figure ci-dessous.

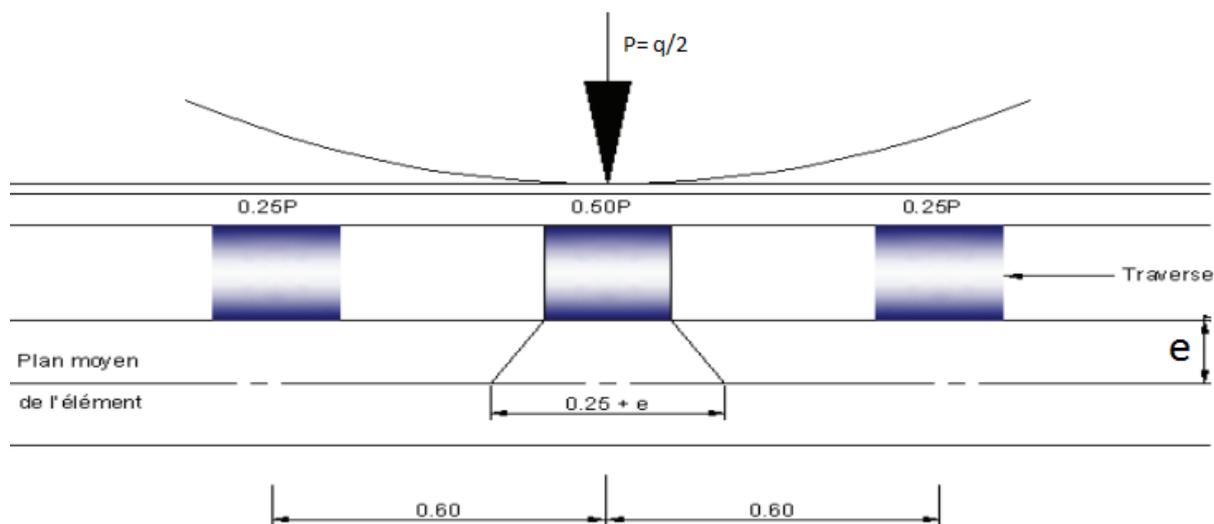


Figure III.4: Répartition de la charge longitudinalement

Transversalement, la charge sous le blochet se répartit comme indiqué dans la figure ci-dessous. Avec $L = 0.4$ m (pour les traverses ou les blochets).

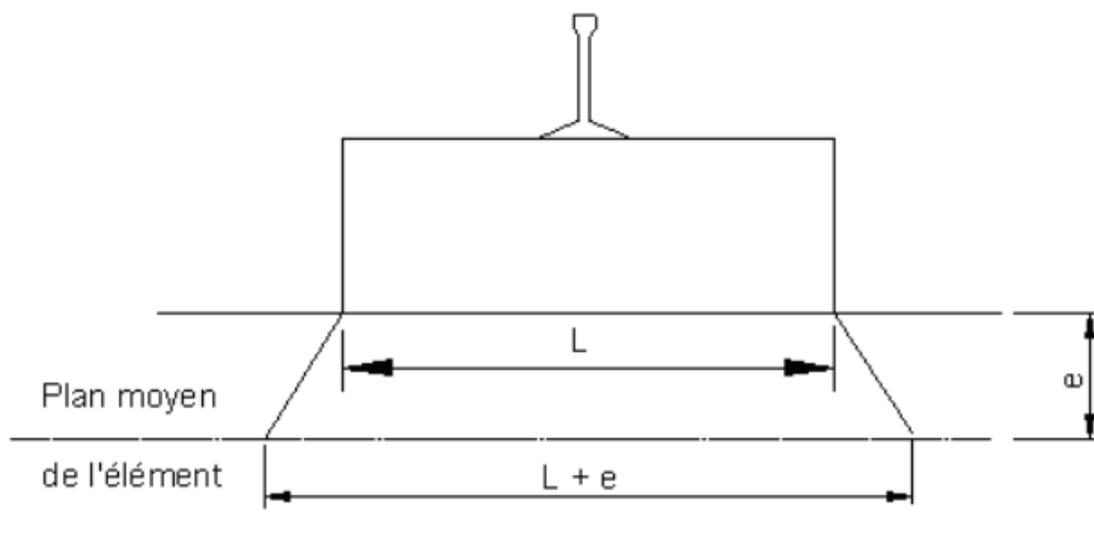


Figure III.5: Répartition des charges transversalement [3]

III.3.1.2. Effet dynamique

Les sollicitations et déformations statiques d'un pont dues aux circulations sont augmentées ou diminuées par les effets suivants :

- La mise en charge rapide provoquée par la vitesse des circulations franchissant l'ouvrage.
- les variations des charges de roue dues aux irrégularités des voies et des roues.
- le passage de charges successives espacées de façon quasi régulière qui peut faire vibrer la structure et, dans certains cas, créer une résonance (lorsque la fréquence d'excitation correspond à la fréquence propre de la structure) Les facteurs suivants influent principalement sur le comportement dynamique :
 - ✓ La fréquence propre de la structure.
 - ✓ L'espacement des essieux.
 - ✓ La vitesse de franchissement.
 - ✓ L'amortissement de la structure.
 - ✓ L'espacement régulier des éléments d'appui de la voie et de ceux de l'ouvrage (traverses, pièces. de pont...).
 - ✓ Les défauts de roues (méplats...).
 - ✓ Les défauts verticaux de la voie.

Ces effets dynamiques sont pris en compte, au moyen des coefficients \emptyset_2 ou \emptyset_3 ; définis suivant le livret 2.01 article 1.3.2 de la SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer français).

III.3.1.3. Coefficients dynamiques Φ_1 et Φ_2

Les coefficients dynamiques sont pris en compte, afin de considérer l'amplification dynamique des contraintes et l'effet des vibrations de la structure. Ces derniers sont valables si les deux conditions sur la flèche sous poids permanent et la vitesse ($V \leq 220$) sont vérifiées.

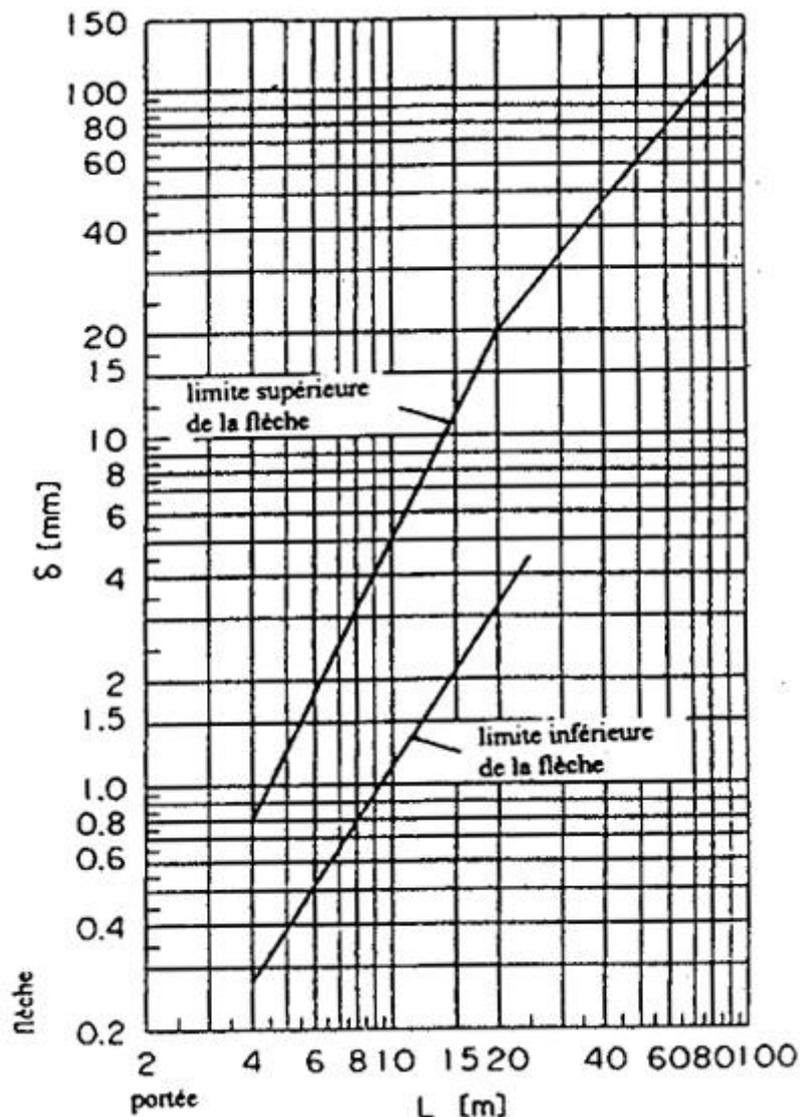


Figure III.6: Limites de la flèche sous le poids permanent [3]

Vérification

- Limite supérieure de la flèche

L : la portée principale, qui est égale à 51 m

$$20 \text{ m} \leq L \leq 100 \text{ m}$$

$$\delta_i = 0,564 \cdot L^{1,184} = 59,29 \text{ mm}$$

- **Limite inférieure de la flèche**

$L > 25 \text{ m}$; Pas de limite inférieure.

Vu l'importance de l'ouvrage, on considère que la voie est soigneusement entretenue.

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,82$$

D'où: $1 < \Phi_2 < 1,67$

L_Φ : Longueur caractéristique, dépend de l'élément de structure ; elle est indiquée dans le tableau suivant.

Tableau III.1: longueur déterminante [3]

Poutres principales			
5.1	Poutres et dalles isostatiques sur appui simple (y compris les poutrelles d'acier enrobées dans le béton)	Portée dans le sens de la poutre principale	
5.2	Poutres et dalles continues sur n portées avec : $L_m = 1/n(L_1 + L_2 + \dots + L_n)$	$L_\Phi = k \times L_m$, mais au moins $\max L_i$ ($i = 1, \dots, n$)	
		n = 2	3 4 ≥ 5
		k = 1,2	1,3 1,4 1,5

avec $\left\{ \begin{array}{l} L_m : \text{longueur moyenne} \\ L_i : \text{longueur des travées} \end{array} \right\}$

$$L_\Phi = k \times L_m = 1,5 \times 41,82 = 62,74 \text{ m}$$

$$\phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,82 = \frac{1,44}{\sqrt{62,74} - 0,2} + 0,82 = 1,00$$

$$\phi_2 = 1,00$$

III.3.2. Charges horizontales

III.3.2.1. Forces centrifuges

Etant donné que le tracé est composé de deux courbes, il y a lieu de prendre en compte la force centrifuge.

La valeur caractéristique sera obtenue en appliquant les expressions suivantes :

$$Q_{Tk} = \frac{Q_{v,k} \cdot v^2}{127 \cdot r} \cdot f$$

$$q_{tk} = \frac{q_{v,k} \cdot v^2}{127 \cdot r} \cdot f$$

Q et q : Valeurs caractéristiques des charges verticales du train (227.5 kN et 72.8 kN/m)

V : Vitesse maximale spécifique dans le tronçon d'emplacement du viaduc en Km/h.

r : Rayon en plan de la courbe correspondant à l'axe de la plateforme (m).

f : Coefficient réducteur qui vaut 1, lorsque $V < 120$ km/h

Pour les rayons présents sur le viaduc, et prenant en considération une vitesse maximale de 70 km/h on obtient pour chaque voie :

$$q_{tk} (R = 1500 \text{ m}) = 1.87 \text{ kN / m.}$$

$$q_{tk} (R = 1195 \text{ m}) = 2.35 \text{ kN / m.}$$

$$Q_{tk} (R = 1500 \text{ m}) = 5.85 \text{ kN.}$$

$$Q_{tk} (R = 1195 \text{ m}) = 7.34 \text{ kN.}$$

III.3.2.2. Force de lacet

L'effort de lacet doit être considéré comme une force concentrée agissant horizontalement, au niveau supérieur des rails, perpendiculairement à l'axe de la voie. Il doit être appliqué aussi bien sur les voies en alignement que sur les voies en courbe.

La valeur caractéristique de l'effort de lacet doit être prise égale à $Q_{sk} = 100 \text{ kN}$.

III.3.2.3. Forces d'accélération et de freinage

Les actions de freinage et de démarrage des véhicules ferroviaires, seront assimilées aux forces horizontales, parallèles à la voie, uniformément distribuées le long d'une longueur déterminée et appliquées au niveau du plan moyen de roulement.

D'où:

$$F_{\text{freinage}} = \alpha \times 20 \text{ (kN/m)} \times L \text{ (m)} < 6000 \text{ kN} \rightarrow 0.91 \times 20 \times 101.6$$

$$F_{\text{freinage}} = 1849.12 \text{ kN}$$

$$F_{\text{Démarrage}} = \alpha \times 33 \text{ (kN/m)} \times L \text{ (m)} < 1000 \text{ kN} \rightarrow 0.91 \times 33 \times 101.6$$

$$F_{\text{Démarrage}} = 1000 \text{ kN}$$

III.3.2.4. Actions dues au vent

a. Vent compatible avec les circulations W_1

Le vent souffle horizontalement dans une direction normale à l'axe longitudinal de la voie.

La charge du vent est de 1.5 kN/m^2 , appliquée aux surfaces exposées.

On assimile le matériel roulant du chemin de fer à un écran de 3.00 m de hauteur dont le bord inférieur se trouve à 0,50m au-dessus du rail et dont la longueur est à déterminer en vue d'obtenir le maximum de la sollicitation calculée.

Pour le cas de tablier, on considère la surface exposée de 4.00m de haut (en considérant 0.8 m de chemin de service).

W_1 = La hauteur du masque x La pression normale à la surface en contact.

$$\text{La hauteur du masque} = \text{la hauteur du tablier} + \text{la hauteur d'écran} = 4 + 3 = 7 \text{ m}$$

La pression normale à la surface en contact est de 1.5 kN/m^2 .

$$W_1 = 7 \times 1.5 = 10.5 \text{ kN/m}$$

b. L'effort dû au vent sans circulation W_0

On suit la même procédure de calcul utilisé ci-dessus pour calculer W_0

La pression normale à la surface en contact est de 2 kN/m

La hauteur de masque égale à la hauteur de tablier

$$W_0 = 4 \times 2 = 8 \text{ kN/m}$$

III.3.2.5. Action dues aux variations de température

Toute structure exposée aux conditions atmosphérique est soumise à des actions provenant des variations de température, principalement influencée par les conditions climatiques régionales et locales.

- La variation de température uniforme dans le cas de cet ouvrage (nord de l'Algérie) est prise : +35 °C et -15 °C
- La température moyenne peut être comprise entre 10 °C et 25 °C. On a considéré les valeurs extrêmes :

Incrément positif : $35^\circ - 10^\circ = 25^\circ \text{C}$

Incrément négatif : $-15^\circ - 25^\circ = -40^\circ \text{C}$

- Gradient thermique

Le viaduc est classifié comme de type 3 (Tablier en béton, poutre caisson).

Gradient de température positif ($\Delta T_{M, \text{pos}}$) : 10° C

Tableau III.2: Valeurs caractéristiques des gradients linéaires de température [5]

Groupes de tabliers (voir Annexe B)	Ponts routiers		Ponts de chemin de fer	
	Gradient de température positif	Gradient de température négatif	Gradient de température positif	Gradient de température négatif
	$\Delta T_{M, \text{pos}} (^\circ\text{C})$	$\Delta T_{M, \text{neg}} (^\circ\text{C})$	$\Delta T_{M, \text{pos}} (^\circ\text{C})$	$\Delta T_{M, \text{neg}} (^\circ\text{C})$
Groupe 1 : Platelage en acier sur poutres métalliques de type caisson, en treillis ou en I.	[18]	[-13]	[18]	[-13]
Groupe 2 : Dalle en béton sur poutres métalliques de type caisson, en treillis ou en I.	[15]	[-18]	[15]	[-18]
Groupe 3 : Tablier en béton : - poutre caisson - poutre en T - dalle	[10] [15] [15]	[-5] [-8] [-8]	[10] [15] [15]	[-5] [-8] [-8]

Les valeurs des gradients de température données dans le tableau III.2 sont basées sur une épaisseur de revêtement de 50 mm pour les ponts routiers et de chemin de fer.

Pour l'épaisseur de revêtement 100 mm, il convient que ces valeurs soient multipliées par un coefficient k_{sur} , tel que donné dans le tableau III.3. Ce qui donne enfin à l'étape de service un gradient de $\pm 7^{\circ}\text{C}$.

($K_{sur} = 0.7$; Avec l'épaisseur de revêtement égale à 100 mm)

Tableau III.3: Coefficients k_{sur} pour différentes épaisseurs de revêtement [5]

Ponts routiers et de chemin de fer						
Epaisseur de revêtement	béton		acier		composites	
	surface supérieure plus chaude que la partie inférieure	partie inférieure plus chaude que la surface supérieure	surface supérieure plus chaude que la partie inférieure	partie inférieure plus chaude que la surface supérieure	surface supérieure plus chaude que la partie inférieure	partie inférieure plus chaude que la surface supérieure
(mm)	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}
0	1,5 ¹⁾	1,0	1,6 ¹⁾	0,6	1,1	0,9
50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	0,7	1,0	0,7	1,2	1,0	1,0
150	0,5	1,0	0,7	1,2	1,0	1,0
(60 cm)	0,6	1,0	0,6	1,4	0,8	1,2

III.4. Actions accidentelles

L'action sismique sera évaluée en accord avec la norme RPOA 2008 (Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art), complétée par les Eurocodes.

Conditions générales :

- Zone de séisme Alger : Zone III
- Groupe d'élément de construction : Groupe 1 Pont stratégique
- Classification de site : S4
- Coefficient d'accélération de zone : $A = 0,40$

III.5. Combinaisons de charges

III.5.1. Combinaisons de charges en cours de poussage

Les ponts poussés ont une particularité d'être soumis à de nombreux efforts dans les phases de construction, qui sont :

- G : poids propre ;
- P : action de la précontrainte ;
- Q_{pra} : charges d'exécution aléatoire (négligeable) ;
- W : action du vent ;
- $\Delta\theta$: gradient thermique de $\pm 7^\circ\text{C}$;
- DA : efforts de dénivellations d'appuis ;
- Pouss : effet du matériel de poussage.

On distingue les combinaisons suivantes selon que l'on est dans une phase de déplacement ou en phase statique :

Tableau III.4: Combinaisons de charges en cours de poussage [6]

E.L.S		Combinaison d'actions
En cours de déplacements	Rare	$P + G + DA + \text{Pouss}$
	Quasi permanent	$P + G$
En phase statique	Rare	$P + G + DA + \Delta\theta$
	Quasi permanent	$P + G$

E.L.U	Combinaison d'actions
En phase statique	$(P + G \text{ ou } 1.35G) + 1.5W$

III.5.2. Combinaisons de charges en service

Afin de tenir compte de la simultanéité de diverses charges élémentaires sur une ou plusieurs voies, le livret 2.01 de la SNCF nous propose des assemblages d'actions de la circulation ferroviaire, appelés groupes de charges.

Chacun de ces groupes de charges, qui s'excluent l'un à l'autre, doit être considéré comme définissant une action d'exploitation pour les combinaisons avec les charges autres que celles de circulation ferroviaire.

Tableau III.5: Groups de charges [3]

N ^{bre} de voie chargée	Groupe de charge	Voie chargée	UIC71 + SW/0	SW/2	Train à Vide	Freinage / Démarrage	Force centrifuge	Lacet
Une Voie (V1)	Gr1	/	1	0	0	1	0.5	0
	Gr2	/	1	0	0	0.5	1	0
	Gr3	/	1	0	0	1	0.5	1
	Gr4	/	0	1	0	1	0.5	0
	Gr5	/	0	0	1	0	1	0
Deux Voies (V2)	Gr11	V1	1	0	0	1	0.5	0
		V2	1	0	0	1	0.5	0
	Gr12	V1	1	0	0	0.5	1	0
		V2	1	0	0	0.5	1	0
	Gr13	V1	1	0	0	1	0.5	1
		V2	1	0	0	1	0.5	1
	Gr14	V1	1	0	0	0.75	0.5	0
		V2	0	1	0	0.75	0.5	0

Les principales combinaisons de dimensionnement à envisager pour deux voies chargées sont :

Dans ce qui suit :

G_{max} : L'ensemble des actions permanentes défavorables.

G_{min} : L'ensemble des actions permanentes favorables.

G1 : L'ensemble des parties des actions permanentes, y compris les parties du poids propre, qui ont un effet stabilisateur

G2 : L'ensemble des parties des actions permanentes, y compris les parties du poids propre, qui ont un effet déstabilisateur.

Q : actions variables.

Q1 : actions de base.

Qi : actions d'accompagnement.

T_k : actions thermiques

W0 : action du vent sans circulation ferroviaire.

W1 : action du vent avec circulation ferroviaire.

Ψ: Coefficient pour les actions variables (ELU et ELS)

γ: Coefficient pour les actions à l'ELU.

(TR) i : modèle de trafic à la fatigue.

E : action sismique limitée au mouvement d'ensemble, obtenue par la combinaison la plus défavorable des composantes de l'action sismique.

AQS : accotements et quais solidaires

➤ E.L.U. d'équilibre statique

Forme générale

$$\gamma_{G_1} G_1 + \gamma_{G_2} G_2 + \gamma_{Q_1} Q_1 + \sum_{i>1} 1.5 \psi_{0i} Q_i$$

Avec : $\gamma_{G_1} = 0.9$

$$\gamma_{G_1} G_1 + \gamma_{G_2} G_2 + 1.45 Gr_{12} + 1.2 AQS + 0.9 T_k + 0.9 W_1$$

$$\text{Max}[1.45 Gr_{11}, 1.35 Gr_{14}] + 1.2 AQS + 0.9 T_k$$

$$1.5 T_k + 1.16 Gr_{11} + 1.2 AQS$$

➤ E.L.U. fondamentale (résistance)

Forme générale

$$\gamma_p P_k + 1.35 G_{max} + G_{min} + \gamma_{Q_1} Q_1 + \sum_{i>1} 1.5 \psi_{Qi} Q_i$$

$\gamma_p = 1.00$ dans le cas usuel.

$$\gamma_p P_k + 1.35 G_{max} + G_{min} + 1.45 Gr_{12} + 1.2 AQS + 0.9 T_k + 0.9 W_1$$

$$\text{Max}[1.45 Gr_{11}, 1.35 Gr_{14}] + 1.2 AQS + 0.9 T_k$$

$$1.5 T_k + 1.16 Gr_{11} + 1.2 AQS$$

➤ E.L.U accidentels (résistance, équilibre statique)

Forme générale

$$P_k + G_{max} + G_{min} + A_d + \psi_{11} Q_{K1} + 0.5 T_k$$

$$P_k = 0 \text{ pour l'équilibre statique}$$

- Cas de résistance

$$P_k + G_{max} + G_{min} + A_d + 0.6 Gr_{14} + 0.5 T_k$$

- Cas d'équilibre statique

$$G_1 + G_2 + A_d + 0.6 Gr_{14} + 0.5 T_k$$

➤ E.L.U sismiques (résistance, équilibre statique)

Formule générale

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + A_s + \sum_{i > 1} \psi_{si} Q_{ki}$$

- 0 voie chargée : $G_{max} + 0.6E$
- 1 voie chargée : $G_{max} + 0.6E + 0.3Gr_1$

➤ E.L.S rares

Forme générale

$$P_k + G_{max} + G_{min} + Q_{K1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{Qi} Q_{ki}$$

$$P_k + G_{max} + G_{min} + Gr_{12} + 0.8 AQS + 0.6T_k + 0.6W_i$$

$$Gr_{11} \text{ ou } Gr_{14} + 0.8AQS + 0.6T_k$$

$$T_k + 0.8Gr_{11} + 0.8 AQS$$

➤ E.L.S fréquents

Forme générale

$$P_k + G_{max} + G_{min} + \psi_{11} Q_{K1} + 0.5T_k$$

$$P_k + G_{max} + G_{min} + 0.6(Gr_{11} \text{ ou } Gr_{14}) + 0.5T_k$$

➤ E.L.S quasi-permanents

Forme générale

$$P_k + G_{max} + G_{min} + 0.5 T_k$$

➤ E.L.S de fatigue

Forme générale

$$\sum_{i \geq 1} G_{ki} + P_k + Q_{k1} + 0.6T_k$$

$$P_k + G_{max} + G_{min} + (TR)_1 + (TR)_2 + 0.6$$

III.6. Conclusion

Après avoir évalué les charges et surcharges susceptibles d'être appliquées sur l'ouvrage, il y a lieu de calculer les sollicitations auxquelles il est soumis, ces dernières sont déterminées dans le chapitre suivant (calcul des sollicitations).

Chapitre IV

Calcul des sollicitations

IV.1. Introduction

Le présent chapitre va porter sur le calcul des sollicitations dans les différentes sections du tablier sous les combinaisons citées dans le chapitre précédent en phase de poussage ainsi qu'en phase de service à l'aide de logiciel Autodesk **Robot Structural Analysis Professional**.

IV.2. Phase de poussage

En cours de poussage, le tablier subit différents types de sollicitations, engendrées par :

- Son poids propre
- La dénivellation d'appui
- Le gradient thermique de $7C^{\circ}$
- L'effort de poussage

Afin de réduire les moments du porte-à-faux, le tablier est doté d'un avant-bec de 36 m de longueur, une largeur de 4.5 m, avec un poids de 75 tonnes, constitué de deux poutres métalliques à ame pleine.

IV.2.1. Sollicitations dues au poids propre du tablier

Dans cette partie, on s'intéresse aux sollicitations importantes agissantes sur le tablier lors de poussage. Elles correspondent à quatre phases essentielles voir les graphes illustrés dans les figures VI.1 et VI.2:

- Juste avant l'accostage de l'avant-bec
- La jonction entre l'avant-bec et le tablier, est à $0.63 L$
- La jonction entre l'avant-bec et le tablier est à $0.9 L$
- Avant-bec en porte-à-faux

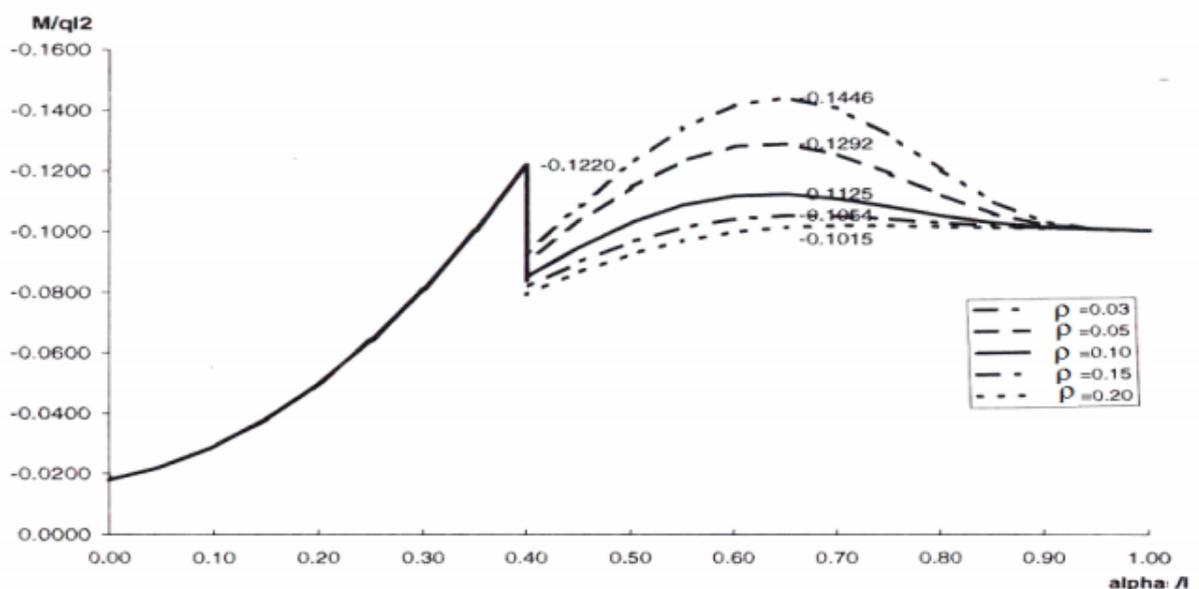


Figure IV.1: Variation du moment maximal sur appui [6]

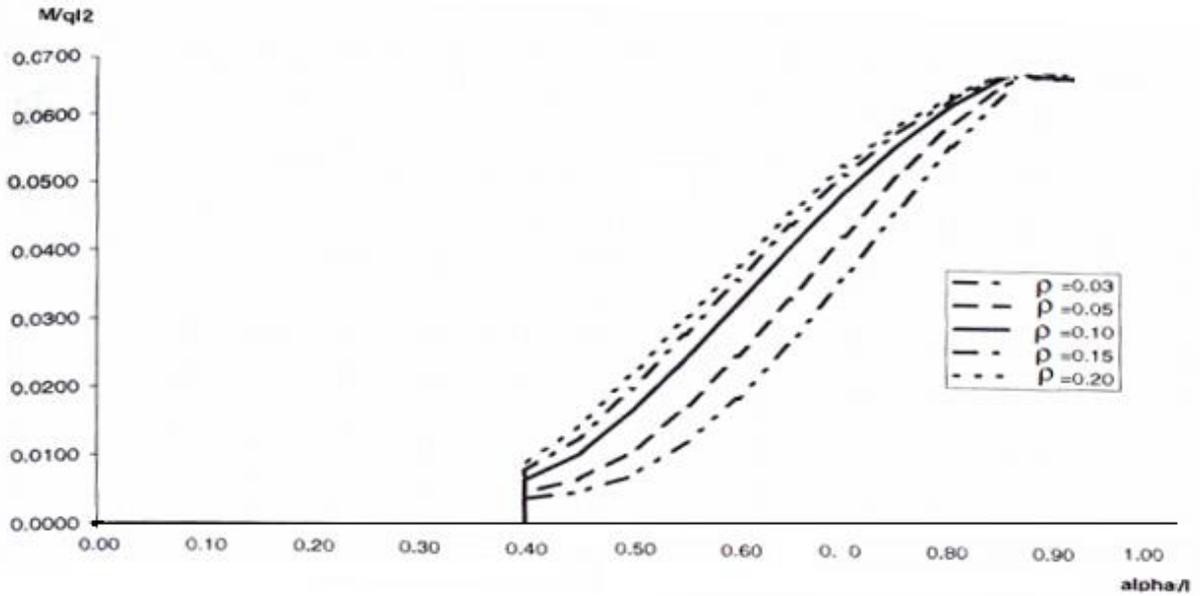


Figure IV.2: Variation du moment maximal en travée [6]

IV.2.1.1. Tronçon 3

Situé entre la culée C-2 et la pile P-27, avec une longueur de 379.50 m. cette partie de l'ouvrage a besoin de 32 phase de poussage pour qu'elle soit à sa place définitive.

➤ Phase 1



Figure IV.3: Schéma statique phase 1

Tableau IV.1: Les sollicitations maximales de la phase 1

M_{max} en travée (T.m)	M_{max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
0	-1903.03	157.47

➤ Phase 2

Figure IV.4: Schéma statique phase 2

Tableau IV.2: les sollicitations maximales de la phase 2

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2652.17	-460.26	308.98

➤ Phase 3

Figure IV.5: Schéma statique phase 3

Tableau IV.3: Les sollicitations maximales de la phase 3

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
3107.93	-1084.32	398.04

➤ Phase 4

Figure IV.6: Schéma statique phase 4

Tableau IV.4: Les sollicitations maximales de la phase 4

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
3033.81	-1376.64	474.94

➤ Phase 5

Figure IV.7: Schéma statique phase 5

Tableau IV.5: Les sollicitations maximales de la phase 5

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2425.15	-2793.89	671.91

➤ Phase 6

Figure IV.8: Schéma statique phase 6

Tableau IV.6: Les sollicitations maximales de la phase 6

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
1884.97	-4210.88	909.24

➤ Phase 7

Figure IV.9: Schéma statique phase 7

Tableau IV.7: Les sollicitations maximales de la phase 7

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2137.05	-3806.49	921.01

➤ Phase 8

Figure IV.10: Schéma statique phase 8

Tableau IV.8: Les sollicitations maximales de la phase 8

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2054.92	-3783.51	916.33

➤ Phase 9

Figure IV.11: Schéma statique phase 9

Tableau IV.9: Les sollicitations maximales de la phase 9

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
412.27	-2051.06	148.49

➤ Phase 10

Figure IV.12.: Schéma statique phase 10

Tableau IV.10: Les sollicitations maximales de la phase 10

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2296.82	-3917.71	857.09

➤ Phase 11

Figure IV.13: Schéma statique phase 11

Tableau IV.11: Les sollicitations maximales de la phase 11

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2303.13	-3424.34	863.02

➤ Phase 12

Figure IV.14: Schéma statique phase 12

Tableau IV.12: Les sollicitations maximales de la phase 12

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2204.64	-3351.17	859.54

➤ Phase 13

Figure IV.15: Schéma statique phase 13

Tableau IV.13: Les sollicitations maximales de la phase 13

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2243.57	-3398.8	858.13

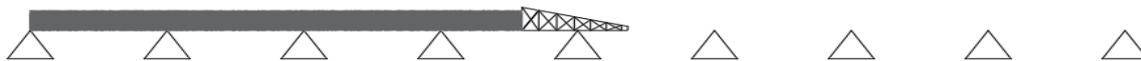
➤ Phase 14

Figure IV.16: Schéma statique phase 14

Tableau IV.14: Les sollicitations maximales de la phase 14

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2171.92	-4000.09	870.7

➤ Phase 15

Figure IV.17: Schéma statique phase 15

Tableau IV.15: Les sollicitations maximales de la phase 15

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2257.09	-3529.26	877.06

➤ Phase 16

Figure IV.18: Schéma statique phase 16

Tableau IV.16: Les sollicitations maximales de la phase 16

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2185.19	-3504.29	872.2

➤ Phase 17

Figure IV.19: Schéma statique phase 17

Tableau IV.17: Les sollicitations maximales de la phase 17

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2208.47	-4548.64	858.25

➤ Phase 18

Figure IV.20: Schéma statique phase 18

Tableau IV.18: Les sollicitations maximales de la phase 18

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2212.26	-5063.8	958.29

➤ Phase 19

Figure IV.21: Schéma statique phase 19

Tableau IV.19: Les sollicitations maximales de la phase 19

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
3198.6	-4286.12	958.72

➤ Phase 20

Figure IV.22: Schéma statique phase 20

Tableau IV.20: Les sollicitations maximales de la phase 20

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
3132.28	-4236.86	953.31

➤ Phase 21

Figure IV.23: Schéma statique phase 21

Tableau IV.21: Les sollicitations maximales de la phase 21

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2199.56	-4548.64	861.25

➤ Phase 22

Figure IV.24: Schéma statique phase 22

Tableau IV.22: Les sollicitations maximales de la phase 22

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2197.83	-5377.03	1006.4

➤ Phase 23

Figure IV.25: Schéma statique phase 23

Tableau IV.23: Les sollicitations maximales de la phase 23

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
3009.22	-4726.8	1014.88

➤ Phase 24

Figure IV.26: Schéma statique phase 24

Tableau IV.24: Les sollicitations maximales de la phase 24

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2938.81	-4682.55	1009.84

➤ Phase 25

Figure IV.27: Schéma statique phase 25

Tableau IV.25: Les sollicitations maximales de la phase 25

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2201.06	-4648.64	909.43

➤ Phase 26

Figure IV.28: Schéma statique phase 26

Tableau IV.26: Les sollicitations maximales de la phase 26

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2236.02	-5272.34	991.88

➤ Phase 27

Figure IV.29: Schéma statique phase 27

Tableau IV.27: Les sollicitations maximales de la phase 27

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
3065.02	-4596.2	999.35

➤ Phase 28

Figure IV.30: Schéma statique phase 28

Tableau IV.28: Les sollicitations maximales de la phase 28

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2995.64	-4550.37	994.29

➤ Phase 29

Figure IV.31: Schéma statique phase 29

Tableau IV.29: Les sollicitations maximales de la phase 29

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2200.59	-4548.64	936.29

➤ Phase 30

Figure IV.32: Schéma statique phase 30

Tableau IV.30: Les sollicitations maximales de la phase 30

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
2200.47	-5299	995.58

➤ Phase 31

Figure IV.33: Schéma statique phase 31

Tableau IV.31: Les sollicitations maximales de la phase 31

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
3050.46	-4629.53	1003.4

➤ Phase 32

Figure IV.34: Schéma statique phase 32

Tableau IV.32: Les sollicitations maximales de la phase 32

M_{\max} en travée (T.m)	M_{\max} sur Appui (T.m)	Réaction maximale (T)
3636.48	-4953.78	1041.75

IV.2.1.2. Tronçon 1

Situé entre la culée C-1 et la pile P-23, avec une longueur de 918 m. cette partie de l'ouvrage a besoin de 69 phase de poussage pour qu'elle soit à sa place définitive.

On s'intéresse aux memes phases du tronçon 3, afin d'obtenir les sollicitations maximales agissantes sur le tablier en phase de poussage.

Tableau IV.33: Sollicitations maximales dues au poids propre de Tronçon1

Phases	M_{\max} Travée (T.m)	M_{\max} Appui (T.m)	Réaction max (T)
Phase 1	0	-460,26	308,98
Phase 2	9041,51	-7150,53	1910,46
Phase 3	13513,37	-4097,84	2982,36
Phase 4	9480	-13500,22	3598,34
Phase 5	8278,95	-21488,71	6391,57
Phase 6	16115	-21741,53	6815,24
Phase 7	12336,77	-19153,19	6369
Phase 8	9051,53	-22781,13	6630
Phase 9	11481,92	-20970,72	6672,81
Phase 10	10846,02	-20544,31	6601,41
Phase 11	10690,13	-24763,11	6818,49
Phase 12	18353,12	-24869,57	7277
Phase 13	13815,88	-22042,11	6829
Phase 14	12301,69	-20989,41	6662,33
Phase 15	12001,27	-20770,2	6627,63
Phase 16	13016,58	-21494,4	6742,34
Phase 17	12369,68	-21038,21	6670,07
Phase 18	12725,59	-21289,21	6709,83
Phase 19	12461,14	-21102,74	6680,29
Phase 20	12590,74	-21194,13	6694,28
Phase 21	12558,35	-21171,28	6691,15
Phase 22	12694,61	-35932,37	6706,64
Phase 23	16228,68	-42812,18	8447,63
Phase 24	28349,41	-33512,12	8094,57
Phase 25	20613,81	-35932,37	7380,56
Phase 26	17361,68	-47946,64	9473,64
Phase 27	24582,32	-42056,74	9488,4
Phase 28	20603,66	-35932,37	8725,84
Phase 29	21337,16	-45414,81	9123,58
Phase 30	25803,94	-39238,43	9137,93
Phase 31	20387,53	-36666,23	8818,07
Phase 32	19997,97	-45967,84	9204,66
Phase 33	25486,88	-39958,98	9227,53
Phase 34	20429,57	-36520,64	8799,97
Phase 35	20352,01	-45815,48	9182,32
Phase 36	25572,96	-39763,34	9203,21
Phase 37	20417,19	-36563,49	8805,3
Phase 38	20256,79	-45856,01	9188,26

La suite de tableau présentant Sollicitations maximales dues au poids propre lors de poussage du Tronçon 1, est donnée dans l'annexe A.1.

IV.2.2. Sollicitations dues à La dénivellation d'appuis

Les ouvrages poussés sont sensibles aux effets des dénivellations d'appuis qui proviennent : [6]

- Des erreurs de nivellement des appuis ;
- D'un tassement de ces mêmes appuis sous l'effet des charges appliquées ;
- Des imprécisions géométriques dues au coffrage.

IV.2.2.1. Principe de calcul

On suppose qu'il existe un nombre infini de travées intermédiaires identiques de longueur L . la longueur de la travée de rive est : $L_1 = \alpha L$ [6]

En utilisant l'équation des trois moments, on détermine les moments sur appuis dus aux dénivellations d'appuis :

$$M_{i-1}L_i + 2M_i(L_i + L_{i+1}) + M_{i+1}L_{i+1} = -6EI \left[V_i \left(\frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_{i+1}} \right) - \left(\frac{V_{i-1}}{L_i} + \frac{V_{i+1}}{L_i} \right) \right]$$

On distingue quatre cas possibles :

➤ Dénivellation sur la culée

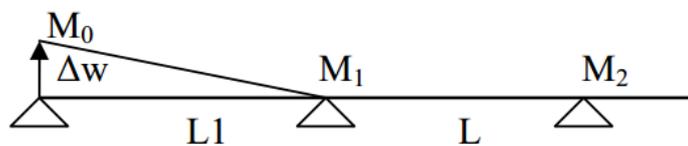


Figure IV.35: Effet d'une dénivellation sur culée [6]

$$M_1 = \frac{1}{\alpha(2\alpha + \sqrt{3})L^2} \frac{6EI}{L^2} \Delta_w$$

➤ Dénivellation sur l'appui 1

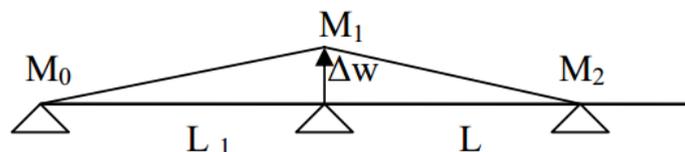


Figure IV.36: Effet d'une dénivellation sur le premier appui [6]

$$M_1 = -\frac{\left(\frac{1}{\alpha}+1\right)(2+\sqrt{3})+1}{(2\alpha+2)(2+\sqrt{3})-1} \frac{6EI}{L^2} \Delta_w$$

$$M_2 = \frac{2\alpha+3+\frac{1}{\alpha}}{(2\alpha+2)(2+\sqrt{3})-1} \frac{6EI}{L^2} \Delta_w$$

➤ Dénivellation sur l'appui 2

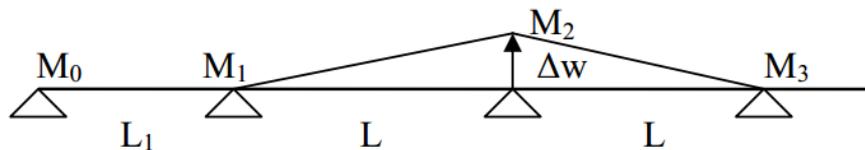


Figure IV.37: Effet d'une dénivellation sur le deuxième appui [6]

$$M_2 = -\frac{(2+\sqrt{3})\left(2+\frac{1}{2(\alpha+1)}\right)+1}{(2+\sqrt{3})\left(4-\frac{1}{2(\alpha+1)}\right)-1} \frac{6EI}{L^2} \Delta_w$$

$$M_3 = \frac{6}{(2+\sqrt{3})\left(4-\frac{1}{2(\alpha+1)}\right)-1} \frac{6EI}{L^2} \Delta_w$$

➤ Dénivellation sur l'appui intermédiaire

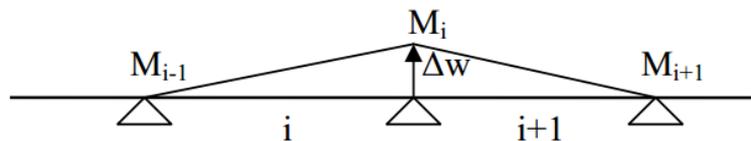


Figure IV.38: Effet d'une dénivellation sur l'appui intermédiaire [6]

$$M_i = -\frac{3+\sqrt{3}}{(2+\sqrt{3})2-1} \frac{6EI}{L^2} \Delta_w = -0.7321 \frac{6EI}{L^2} \Delta_w$$

$$M_{i-1} = M_{i+1} = \frac{3}{(2+\sqrt{3})2-1} \frac{6EI}{L^2} \Delta_w = -0.4641 \frac{6EI}{L^2} \Delta_w$$

IV.2.2.2. Calcul des moments

Concernant le moment maximal dû aux dénivellations d'appui en travée, est donné par la formule suivante :

$$M_t = 0.1699 \frac{6EI}{L^2} \Delta_w = 954.57 \text{ kN.m}$$

Par contre les moments sur appuis s'obtiennent pour chaque quatrième phase de poussage (avant-bec en port-à-faux).

IV.2.2.2.1 Tronçon 3

$$E = 37619.5 \text{ MPa} , \quad \Delta_w = 5 \text{ mm}$$

$$I = 10.08 \text{ m}^4 , \quad \alpha = 0.9$$

Tableau IV.34: Moments de dénivellation de la phase 1

Phase 1	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)
Tassement de la culée	473.53	-1767.26
Tassement de l'appui 1	3783.98	-2519.21
Tassement de l'appui 2	-	-2328.70

The diagram shows a horizontal beam with three supports labeled M_0 , M_1 , and M_2 . The distance between M_0 and M_1 is 45.5 m, and the distance between M_1 and M_2 is 45 m.

Tableau IV.35: Moments de dénivellation de la phase 2

Phase 2	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)
Tassement de la culée	473.53	-1767.26
Tassement de l'appui 1	3783.98	-2519.21
Tassement de l'appui 2	3231.23	-2328.70
Tassement de l'appui 3	-	-2607.24

The diagram shows a horizontal beam with four supports labeled M_0 , M_1 , M_2 , and M_3 . The distances between the supports are 40.5 m between M_0 and M_1 , 45 m between M_1 and M_2 , and 45 m between M_2 and M_3 .

Tableau IV.36: Moments de dénivellation de la phase 3

Phase 3	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)
Tassement de la culée	473.53	-1767.26
Tassement de l'appui 1	3783.98	-2519.21
Tassement de l'appui 2	3231.23	-2328.70
Tassement de l'appui 3	4112.82	-2607.24
Tassement de l'appui 4	-	2607.24

The diagram shows a horizontal beam with five supports represented by blue triangles. The supports are labeled M_0 , M_1 , M_2 , M_3 , and M_4 from left to right. The distances between the supports are: 40.5 m between M_0 and M_1 , 45 m between M_1 and M_2 , 45 m between M_2 and M_3 , and 45 m between M_3 and M_4 .

Tableau IV.37: Moments de dénivellation de la phase 4

Phase 4	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)
Tassement de la culée	473.53	-1767.26
Tassement de l'appui 1	3783.98	-2519.21
Tassement de l'appui 2	3231.23	-2328.70
Tassement de l'appui 3	4112.82	-2607.24
Tassement de l'appui 4	4112.82	-2607.24
Tassement de l'appui 5	-	-2029.86

The diagram shows a horizontal beam with six supports represented by blue triangles. The supports are labeled M_0 , M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , and M_5 from left to right. The distances between the supports are: 40.5 m between M_0 and M_1 , 45 m between M_1 and M_2 , 45 m between M_2 and M_3 , 45 m between M_3 and M_4 , 45 m between M_4 and M_5 , and 51 m between M_5 and the final support.

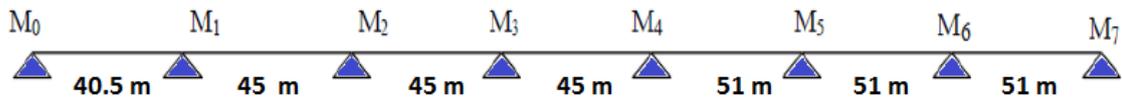
Tableau IV.38: Moments de dénivellation de la phase 5

Phase 5	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)
Tassement de la culée	473.53	-1767.26
Tassement de l'appui 1	3783.98	-2519.21
Tassement de l'appui 2	3231.23	-2328.7
Tassement de l'appui 3	4112.82	-2607.24
Tassement de l'appui 4	4112.82	-2607.24
Tassement de l'appui 5	3202.03	-2029.86
Tassement de l'appui 6	-	-2029.86

The diagram shows a horizontal beam with seven supports represented by blue triangles. The supports are labeled M_0 , M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_5 , and M_6 from left to right. The distances between the supports are: 40.5 m between M_0 and M_1 , 45 m between M_1 and M_2 , 45 m between M_2 and M_3 , 45 m between M_3 and M_4 , 45 m between M_4 and M_5 , 51 m between M_5 and M_6 , and 51 m between M_6 and the final support.

Tableau IV.39: Moments de dénivellation de la phase 6

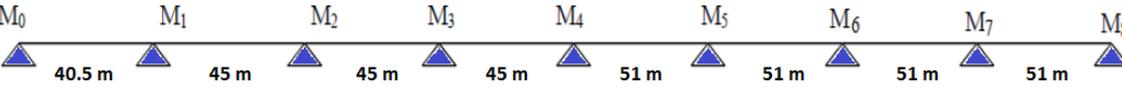
Phase 6	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)
Tassement de la culée	473.53	-1767.26
Tassement de l'appui 1	3783.98	-2519.21
Tassement de l'appui 2	3231.23	-2328.7
Tassement de l'appui 3	4112.82	-2607.24
Tassement de l'appui 4	4112.82	-2607.24
Tassement de l'appui 5	3202.03	-2029.86
Tassement de l'appui 6	3202.03	-2029.86
Tassement de l'appui 7	-	-1884.14



The diagram shows a continuous beam with 8 supports labeled M_0 through M_7 . The spans between supports are: 40.5 m (between M_0 and M_1), 45 m (between M_1 and M_2), 45 m (between M_2 and M_3), 45 m (between M_3 and M_4), 51 m (between M_4 and M_5), 51 m (between M_5 and M_6), and 51 m (between M_6 and M_7). Each support is represented by a blue triangle pointing upwards.

Tableau IV.40: Moments de dénivellation de la phase 7

Phase 7	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)
Tassement de la culée	473.53	-1767.26
Tassement de l'appui 1	3783.98	-2519.21
Tassement de l'appui 2	3231.23	-2328.7
Tassement de l'appui 3	4112.82	-2607.24
Tassement de l'appui 4	4112.82	-2607.24
Tassement de l'appui 5	3202.03	-2029.86
Tassement de l'appui 6	3202.03	-2029.86
Tassement de l'appui 7	2657.91	-1884.14
Tassement de l'appui 8	314.02	-1171.94



The diagram shows a continuous beam with 9 supports labeled M_0 through M_8 . The spans between supports are: 40.5 m (between M_0 and M_1), 45 m (between M_1 and M_2), 45 m (between M_2 and M_3), 45 m (between M_3 and M_4), 51 m (between M_4 and M_5), 51 m (between M_5 and M_6), 51 m (between M_6 and M_7), and 51 m (between M_7 and M_8). Each support is represented by a blue triangle pointing upwards.

IV.2.2.2.2 Tronçon 1

Les moments sur appuis s'obtiennent pour chaque quatrième phase de poussage (avant-bec en port-à-faux), avec la même méthode appliquée pour le tronçon 3.

$$E = 37619.5 \text{ MPa} , \quad \Delta_w = 5 \text{ mm}$$

$$I = 10.08 \text{ m}^4 , \quad \alpha = 0.9$$

Tableau IV.41: Moments maximaux dus aux dénivellations d'appuis de Tronçon 1

Phase	M	Phase	M
Phase 1	-3722,31	Phase 13	-2267,84
Phase 2	-4280,13	Phase 14	-2267,84
Phase 3	-5203,63	Phase 15	-2267,84
Phase 4	-4073,82	Phase 16	-2267,84
Phase 5	-7962,55	Phase 17	-2267,84
Phase 6	-7962,55	Phase 18	-2267,84
Phase 7	-7962,55	Phase 19	-2029,86
Phase 8	-7962,55	Phase 20	-5866,29
Phase 9	-2267,84	Phase 21	-5866,29
Phase 10	-2267,84	Phase 22	-7389,64
Phase 11	-2267,84	Phase 23	-5445,13
Phase 12	-2267,84		

IV.2.3. Moments dus aux Gradient thermique

Le gradient thermique linéaire Δ_θ est uniforme sur toutes les travées, le moment isostatique dû au gradient thermique vaut :

$$M_{\Delta\theta} = \lambda \frac{EI}{h} \Delta_\theta = 829.5 \text{ T.m}$$

$$\lambda = 10^{-5} \text{ (Coefficient de dilatation thermique du béton).}$$

$$\Delta_\theta = 7\text{C}^\circ$$

$$E = 37619.5 \text{ MPa}$$

$$I = 10.08 \text{ m}^4$$

$$H = 3.2 \text{ m}$$

$$\alpha = 0.9$$

Du fait de la continuité de la poutre :

$$M = M_{\Delta\theta} \frac{(3\alpha + \sqrt{3})}{(2\alpha + \sqrt{3})} = 1041 \text{ T.m}$$

IV.3. Phase de service

Cette partie consiste à déterminer les efforts repris par l'ouvrage en phase de service. Et cela à l'aide du logiciel **Robot Structural Analysis** qui nous permet d'avoir les résultats sous forme de diagrammes représentant les moments de flexion, les efforts tranchants ainsi que les moments de torsion.

La modélisation est faite comme suit :

- La structure est représentée par un élément barre sous forme de deux courbes liées par un tronçon rectiligne.
- La section de l'ouvrage est un caisson, définie par le logiciel **AutoCAD** avec ses dimensions réelles.
- Les piles et la culée 2 sont représentées par des appuis simples, et un double au niveau de la culée 1.

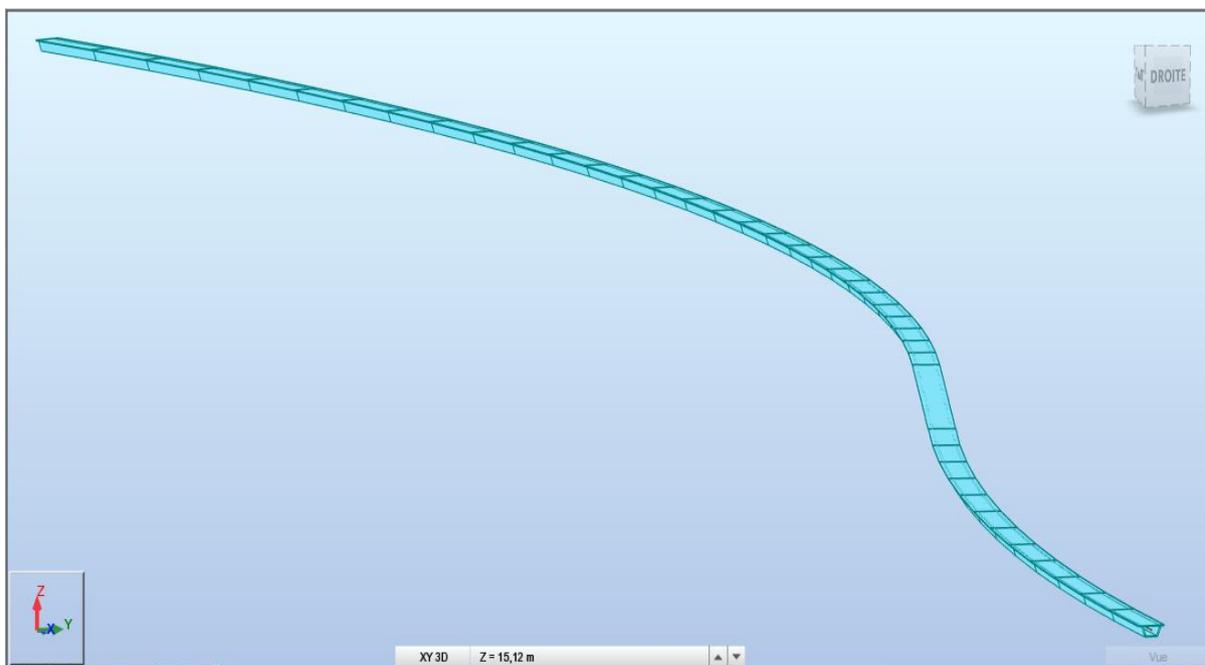


Figure IV.39: Vue en 3D de l'ouvrage sur le logiciel Robot Analysis

IV.3.1.1. Moments de flexion

les diagrammes du moment fléchissant sous différentes combinaisons sont illustrés dans figures ci-dessous :

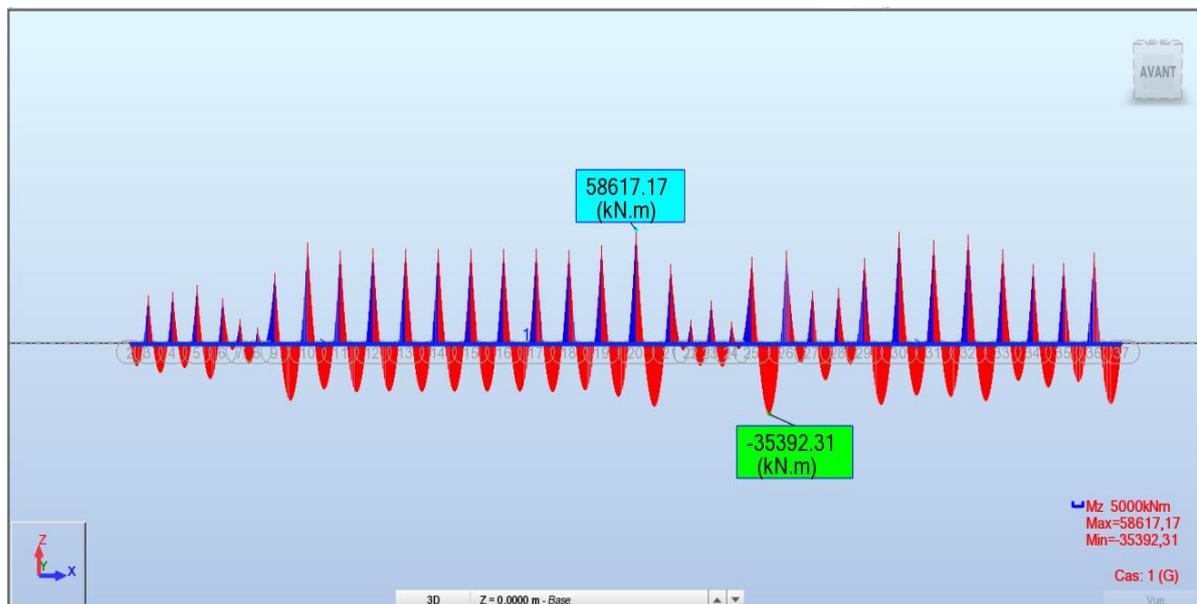


Figure IV.40: Diagramme du moment fléchissant sous charges permanentes

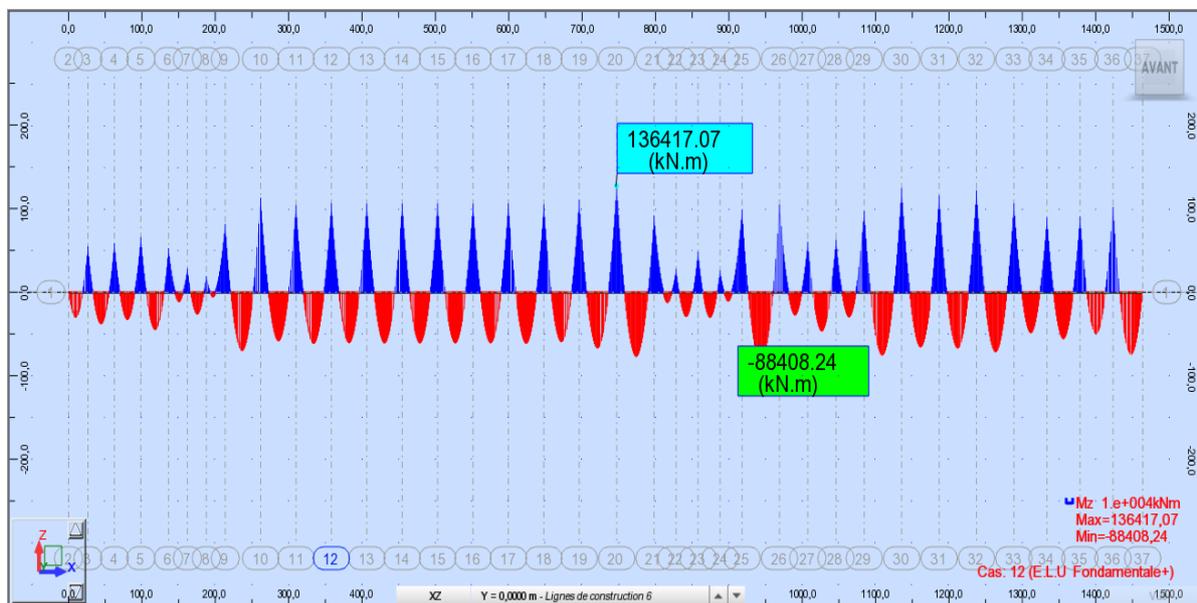


Figure IV.41: Diagramme du moment fléchissant sous combinaison E.L.U Fondamentale

E.L.U Fondamentale → 1.35 G+ 1.45 UIC 71 +1.2 AQS

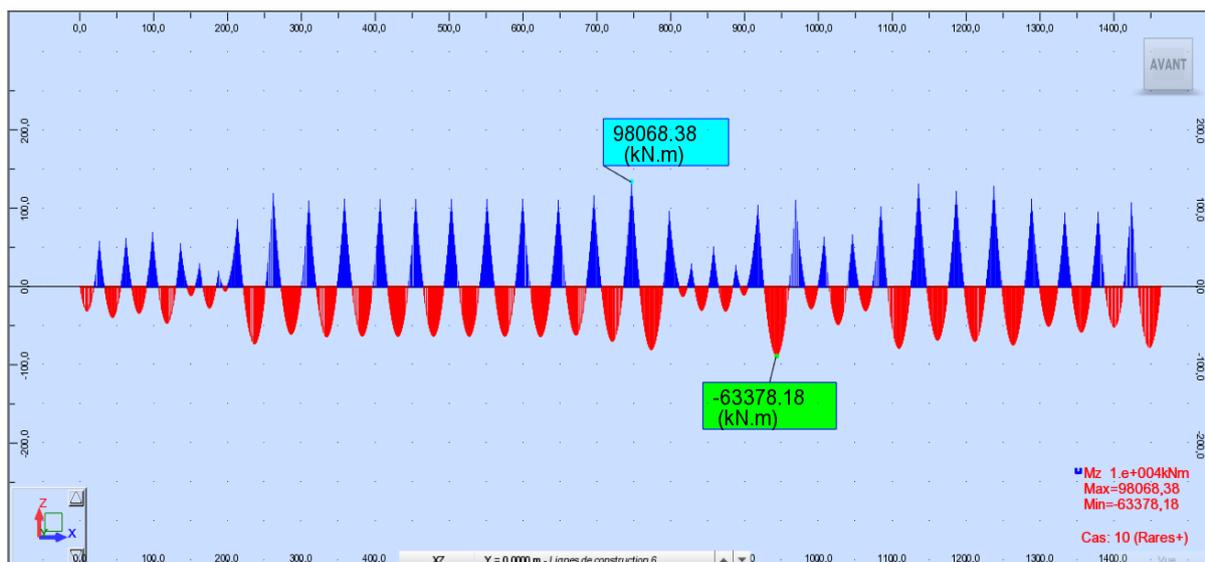


Figure IV.42: Diagramme du moment fléchissant sous combinaison E.L.S

IV.3.1.2. Effort tranchant

Les diagrammes de l'effort tranchant sous différentes combinaisons sont illustrés dans les figures ci-dessous.

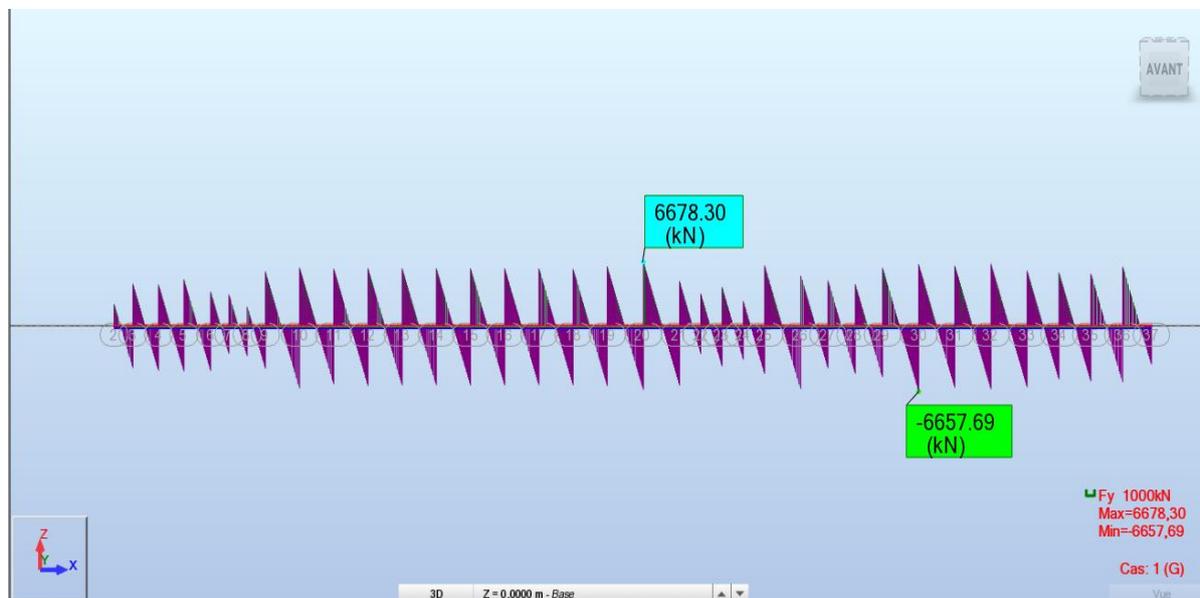


Figure IV.43: Diagrammes des efforts tranchants sous charges permanente

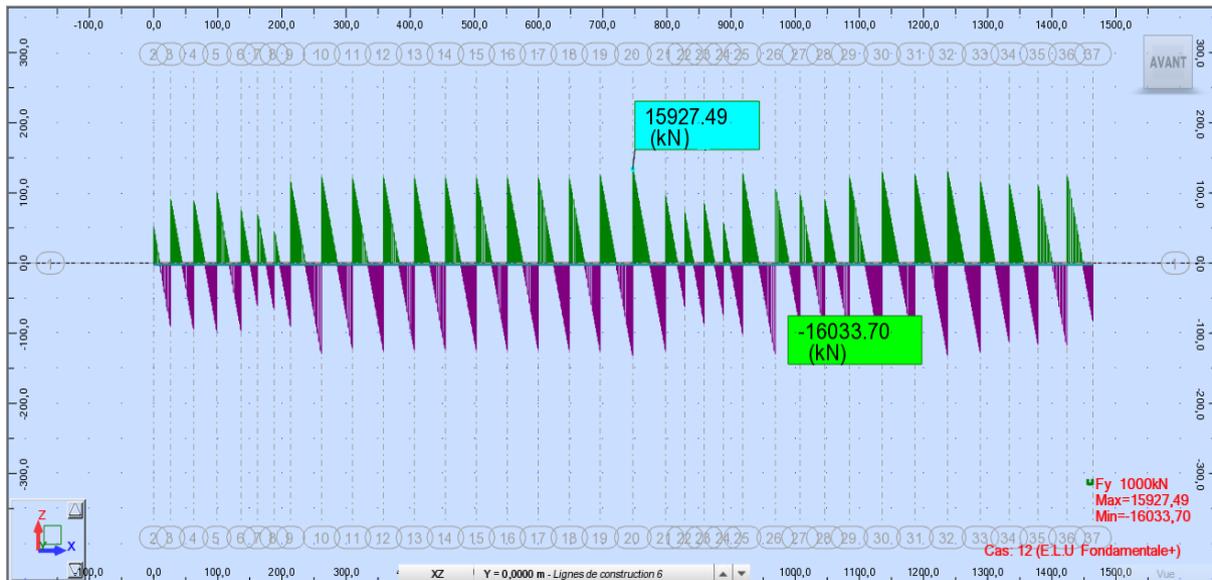


Figure IV.44: Diagrammes des efforts tranchants sous la combinaison E.L.U Fondamental

E.L.U Fondamental → 1.35 G+ 1.45 UIC 71 +1.2 AQS

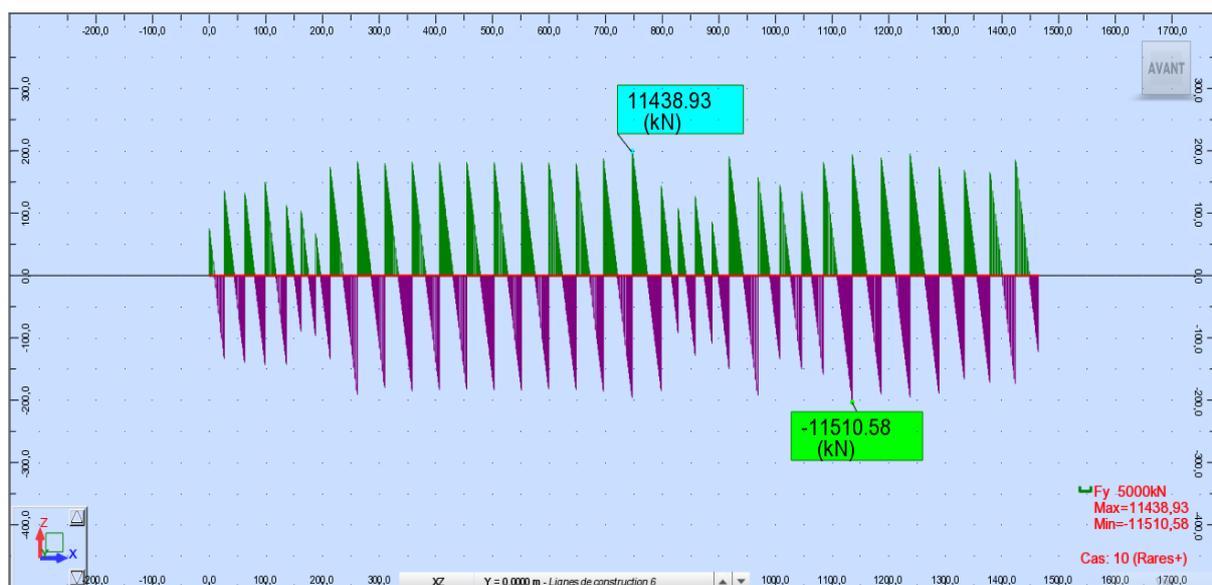


Figure IV.45: Diagrammes des efforts tranchants sous la combinaison E.L.S

IV.4. Conclusion

Vu l'importance de la portée des travées, le béton armé ne peut seul assurer la résistance de notre ouvrage aux sollicitations calculées dans ce chapitre. On se retrouve dans l'obligation d'ajouter des câbles de précontrainte.

Le calcul de cette quantité de précontrainte est l'objet du chapitre qui suit, en assurant la stabilité de l'ouvrage aussi bien en phase de poussage qu'en phase de service.

Chapitre V

Etude de la précontrainte

V.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de déterminer le nombre de câble de poussage et de continuité, ainsi que leur disposition. Ces derniers vont assurer la stabilité de notre ouvrage en construction et en service ; cela en introduisant dans les calculs la nature et l'intensité des actions qui sont fixés dans le chapitre précédent.

V.2. Conception de la précontrainte

La précontrainte longitudinale sert à assurer l'intégrité du béton du tablier aussi bien pendant les phases de construction que durant l'exploitation de l'ouvrage.

Vu que le tablier est réalisé par tronçons successifs, et que toutes les sections passent d'un moment à un autre par le centre d'une travée ou par-dessus d'une pile, la précontrainte est spécifique, appelée couramment précontrainte de poussage.

Plus tard la précontrainte de poussage est complétée par une précontrainte de continuité.

V.2.1. Précontrainte de poussage

On parle d'une précontrainte intérieure, droite et centrée avec la section du tablier. Cette précontrainte doit être centrée (le centre de gravité de tous les câbles doit coïncider avec le centre de gravité de la section en béton).

Cela permet à toutes les sections de résister alternativement aux moments positifs comme aux moments négatifs.

L'obtention d'une précontrainte centrée peut se faire soit à l'aide d'un câblage rectilignes, soit à l'aide d'un câblage antagoniste.

La précontrainte de poussage est réalisée au fur et à mesure de la construction des différents tronçons. Elle sert à reprendre les efforts dus :

- Au poids propre du tablier ;
- Au gradient thermique de construction ;
- Et aux dénivellations d'appui.

Une partie de la précontrainte est provisoire, les câbles correspondants seront détendus en fin de poussage.

V.2.1.1. Câblage rectiligne

Pour obtenir une précontrainte centrée, on a opté pour un câblage rectiligne, constitué de câbles droits situés dans les hourdis supérieur et inférieur, à l'intérieur de béton.

Les câbles supérieurs en travée et inférieurs sur appui seront en général détendus à la fin de poussage, à cause de leur effet défavorable sur le tablier, en créant des moments agissant dans le même sens que les moments engendrés par les sollicitations extérieures.

Le reste des câbles sont définitifs, en participant à la résistance de tablier en phase de service.

La continuité des câbles est assurée par leur croisement au niveau des déviateurs, situés aux points du moment nul des travées définitives.

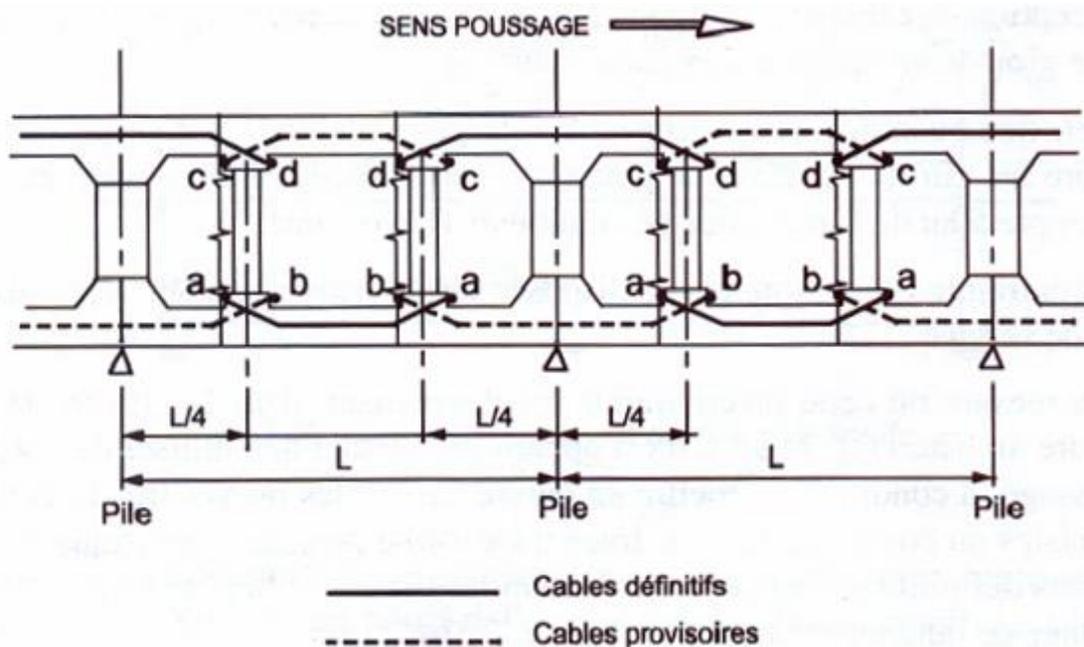


Figure V.1: Précontrainte de poussage [6]

V.2.2. Précontrainte de continuité

Une fois le poussage du viaduc terminé, il est nécessaire de le compléter par un câblage supplémentaire, pour qu'il puisse résister aux charges et surcharges de service.

On définit la précontrainte extérieure comme une précontrainte qui est localisée en-dehors de la masse de béton mais sans qu'elle soit à l'extérieur du champ de cette dernière.

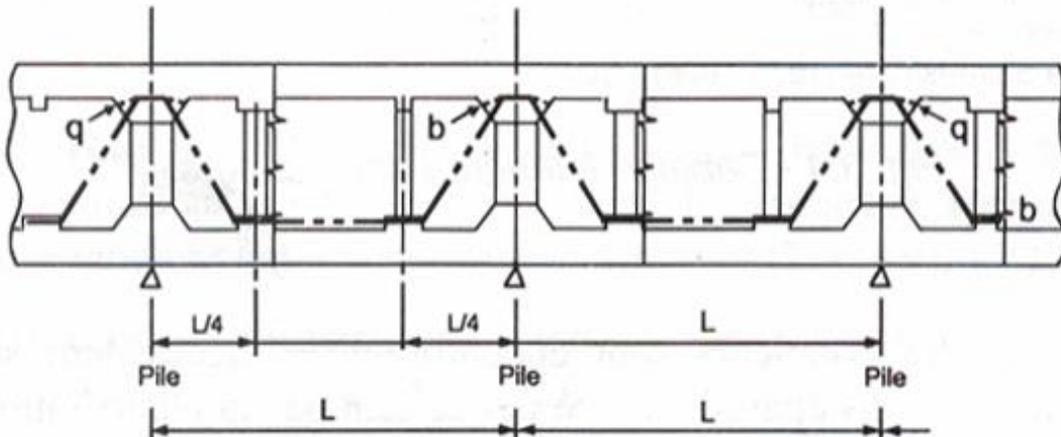


Figure V.2: Câblage de continuité extérieure [6]

Elle est constituée de câbles extérieurs, qui passent en fibre supérieure sur pile, et en fibre inférieure dans la zone centrale des travées en formant un tracé trapézoïdale. Ce tracé est réalisé à l'aide des pièces de déviation, deux entretoises déviateuses en travée.

Ce tracé permet d'améliorer le rendement de la précontrainte et d'utiliser sa composante verticale comme renforcement vis à vis de l'effort tranchant.

De plus son efficacité à l'effort tranchant, la précontrainte extérieure présente plusieurs avantages :

- Amélioration des conditions de bétonnage.
- Amélioration des conditions de mise en œuvre des câbles de précontrainte.
- Amélioration des conditions d'injection.
- Possibilité de remplacement des câbles extérieurs.
- Allègement des structures et amélioration de leur résistance.

V.2.2.1. Localisation des ancrages

L'ancrage de câbles extérieurs sur des bossages d'ancrage placés sur les âmes, les hourdis ou à la liaison des deux est notablement plus difficile que celui de câbles intérieurs : il apparaît un important effort de cisaillement à la liaison entre le bossage et le reste de la structure.

C'est pourquoi on préfère ancrer les câbles extérieurs sur de robustes entretoises placées à la verticale des appuis, là où leur poids n'induit aucun effet gênant pour la structure. [8]

V.3. Etude de la précontrainte

V.3.1. Précontrainte de Poussage

V.3.1.1. Tracé du câblage

Les câbles situés à l'intérieur de l'hourdis supérieur et inférieur suivent un tracé rectiligne, puis subissent une déviation parabolique en descendant dans les bossages doubles, où ils seront ancrés.

Pour cela, on fixe la distance d'enrobage minimale à respecter, et le point de flèche maximale.

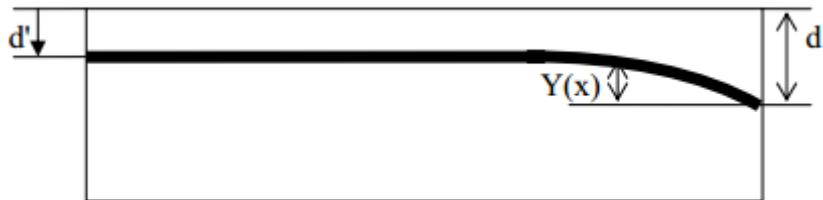


Figure V.3: L'allure des câbles de poussage [9]

La distance d'enrobage minimale :

$$d' = \frac{1}{2}\phi \text{ (gaine)} + d \text{ (enrobage aciers passifs)} + \phi \text{ (Aciers passifs)}$$

L'enrobage des aciers passifs :

$$d = \max \left[\frac{1}{2} \phi \text{ (gaine)}; 4 \text{ cm} \right]$$

Tableau V.1: Distance d'enrobage minimale

Type de câble	Aciers passifs	ϕ (gaine)	ϕ (Aciers passifs)	d (cm)	d' (cm)
12T15	T25	8.5	2.5	4.25	11

L'équation de la courbe est de la forme :

$$Y(x) = d' + (d_1 + d') \cdot \left(\frac{X}{L}\right)^2$$

D'autre part, on a l'équation du rayon de courbure minimal :

$$R(x) = \frac{x^2}{2(d_1 - d')} \geq 6m \quad (R_{\min} = 6m \text{ rayon de courbure minimal d'un câble 12T15})$$

D'où :

$$x \geq \sqrt{12(d_1 - d')} = 1.86 \text{ m}$$

Avec : **d'=0.11m** (distance d'enrobage minimale)

d₁= 0.4m (Point d'ancrage, fait partie des dispositions constructives de la précontrainte)

La tangente au point d'ancrage est la suivante : $Tan(\alpha) = \frac{dy}{dx} = \frac{2(d_1 - d')}{l^2} x$

$$\text{Alors : } \alpha = \text{Arc tan} \left[\frac{2(d_1 - d')}{l^2} x \right] = 0.3015 \text{ rad}$$

$$\alpha = \text{Arc tan} \left[\frac{2(0.4 - 0.11)}{1.86^2} 1.86 \right] = 0.3015 \text{ rad}$$

V.3.1.2. Calcul du nombre de câbles

Dans cette partie, on calculera le nombre de câbles nécessaire pour chaque phase de poussage, puis on prendra le cas le plus défavorable.

Les câbles se présenteront sous deux familles, câbles supérieurs et inférieurs pour chaque section du viaduc, vu que les sections subissent alternativement des moments positifs et négatifs.

L'ouvrage est considéré de classe I, d'où la section du béton est entièrement comprimée en tout point du viaduc.

$$\text{Sur appui} \quad \frac{P}{S} + \frac{Pe_s v}{I} - \frac{M v}{I} \geq 0$$

$$\text{En travée} \quad \frac{P}{S} + \frac{Pe_i v'}{I} - \frac{M v'}{I} \geq 0$$

Avec :

P : effort de précontrainte.

V : Distance entre le centre de gravité et la fibre supérieure ($v = 1.295\text{m}$)

v' : Distance entre le centre de gravité et la fibre inférieure ($v' = 1.905\text{ m}$)

I : Moment d'inertie de la section

S : Section transversale de voussoir

e_s : L'excentricité du câble supérieur par rapport au centre de gravité

$$e_s = 1,295 - 0,11 = 1,185\text{m}$$

e_i : L'excentricité du câble inférieur par rapport au centre de gravité

$$e_i = 1.905 - 0.11 = 1.795\text{m}$$

M : Moment fléchissant total agissant sur la section en cours de poussage

$$M = M_G + M_D + M_{\Delta T}$$

Avec :

M_G : Moment dû au poids propre

M_D : Moment dû aux dénivellations

$M_{\Delta T}$: Moment dû au gradient thermique

- Les pertes de la précontrainte sont estimées à 30 %

$$\sigma_0 = \min(0.8f_{prg}; 0.9f_{peg}) ; \quad \text{Avec} \quad (f_{prg} = 1860; f_{peg} = 1670)$$

$$\text{D'où : } P_u = 0.7P_0 = 0.7 \times \sigma_0 \times S_{\text{nominale}} ; \quad (S_{\text{nominale}} = 140 \text{ mm}^2)$$

$$P_u = 1749.88 \text{ kN}$$

V.3.1.2.1 Tronçon 3

Situé entre la culée C-2 et la pile P-27, avec une longueur de 379.50 m. Le nombre de câbles nécessaire pour reprendre les efforts agissants sur le tablier en cours de poussage est :

$$N \geq \frac{P}{P_u} \text{ Avec : } P \cdot \left(\frac{1}{S} + \frac{e_s v}{I} \right) \geq \frac{M v}{I}$$

Tableau V.2: Calcul des câbles pour le parement Supérieur en cours de poussage

Phase	S	e _s	I/V	M _{max} (kN.m)	P (kN)	P _u (kN)	N
Phase 1	7,195	1,185	5,29	31207,56	16251,26	1749,89	9,29
Phase 2	7,195	1,185	5,29	16779,86	8738,07	1749,89	4,99
Phase 3	7,195	1,185	5,29	23020,46	11987,85	1749,89	6,85
Phase 4	7,195	1,185	5,29	25943,66	13510,09	1749,89	7,72
Phase 5	7,195	1,185	5,29	40868,11	21281,96	1749,89	12,16
Phase 6	7,195	1,185	5,29	55038,01	28660,90	1749,89	16,38
Phase 7	7,195	1,185	5,29	50994,11	26555,05	1749,89	15,18
Phase 8	7,195	1,185	5,29	50764,31	26435,39	1749,89	15,11
Phase 9	7,195	1,185	5,29	33249,30	17314,49	1749,89	9,89
Phase 10	7,195	1,185	5,29	51915,80	27035,02	1749,89	15,45
Phase 11	7,195	1,185	5,29	46982,10	24465,81	1749,89	13,98
Phase 12	7,195	1,185	5,29	46250,40	24084,78	1749,89	13,76
Phase 13	7,195	1,185	5,29	47005,24	24477,86	1749,89	13,99
Phase 14	7,195	1,185	5,29	53018,14	27609,06	1749,89	15,78
Phase 15	7,195	1,185	5,29	48309,84	25157,23	1749,89	14,38
Phase 16	7,195	1,185	5,29	48060,14	25027,20	1749,89	14,30
Phase 17	7,195	1,185	5,29	58503,64	30465,62	1749,89	17,41
Phase 18	7,195	1,185	5,29	63655,24	33148,30	1749,89	18,94
Phase 19	7,195	1,185	5,29	55878,44	29098,56	1749,89	16,63
Phase 20	7,195	1,185	5,29	55385,84	28842,04	1749,89	16,48
Phase 21	7,195	1,185	5,29	57926,26	30164,95	1749,89	17,24
Phase 22	7,195	1,185	5,29	66210,16	34478,77	1749,89	19,70
Phase 23	7,195	1,185	5,29	59707,86	31092,72	1749,89	17,77
Phase 24	7,195	1,185	5,29	59265,36	30862,29	1749,89	17,64
Phase 25	7,195	1,185	5,29	58926,26	30685,70	1749,89	17,54
Phase 26	7,195	1,185	5,29	65163,26	33933,60	1749,89	19,39
Phase 27	7,195	1,185	5,29	58401,86	30412,62	1749,89	17,38
Phase 28	7,195	1,185	5,29	57943,56	30173,96	1749,89	17,24
Phase 29	7,195	1,185	5,29	57780,54	30089,07	1749,89	17,19
Phase 30	7,195	1,185	5,29	65284,14	33996,55	1749,89	19,43
Phase 31	7,195	1,185	5,29	58589,44	30510,30	1749,89	17,44
Phase 32	7,195	1,185	5,29	61831,94	32198,83	1749,89	18,40

D'où : **20** Câbles supérieurs nécessaires pour reprendre les efforts agissants sur l'appui en phase de poussage.

Tableau V.3: Calcul des câbles pour le parement inférieur en cours de poussage

Phase	S	e _i	I/V'	M _{max} (kN.m)	P(kN)	P _u (kN)	N
Phase 1	7,195	1,795	7,78	11364,57	3950,38	1749,89	2,26
Phase 2	7,195	1,795	7,78	37886,27	13169,44	1749,89	7,53
Phase 3	7,195	1,795	7,78	42443,87	14753,68	1749,89	8,43
Phase 4	7,195	1,795	7,78	41702,67	14496,04	1749,89	8,28
Phase 5	7,195	1,795	7,78	35616,07	12380,31	1749,89	7,07
Phase 6	7,195	1,795	7,78	30214,27	10502,62	1749,89	6,00
Phase 7	7,195	1,795	7,78	32735,07	11378,86	1749,89	6,50
Phase 8	7,195	1,795	7,78	31913,77	11093,37	1749,89	6,34
Phase 9	7,195	1,795	7,78	15487,27	5383,45	1749,89	3,08
Phase 10	7,195	1,795	7,78	34332,77	11934,23	1749,89	6,82
Phase 11	7,195	1,795	7,78	34395,87	11956,16	1749,89	6,83
Phase 12	7,195	1,795	7,78	33410,97	11613,81	1749,89	6,64
Phase 13	7,195	1,795	7,78	33800,27	11749,13	1749,89	6,71
Phase 14	7,195	1,795	7,78	33083,77	11500,07	1749,89	6,57
Phase 15	7,195	1,795	7,78	33935,47	11796,12	1749,89	6,74
Phase 16	7,195	1,795	7,78	33216,47	11546,20	1749,89	6,60
Phase 17	7,195	1,795	7,78	33449,27	11627,12	1749,89	6,64
Phase 18	7,195	1,795	7,78	33487,17	11640,29	1749,89	6,65
Phase 19	7,195	1,795	7,78	43350,57	15068,86	1749,89	8,61
Phase 20	7,195	1,795	7,78	42687,37	14838,32	1749,89	8,48
Phase 21	7,195	1,795	7,78	33360,17	11596,15	1749,89	6,63
Phase 22	7,195	1,795	7,78	33342,87	11590,13	1749,89	6,62
Phase 23	7,195	1,795	7,78	41456,77	14410,56	1749,89	8,24
Phase 24	7,195	1,795	7,78	40752,67	14165,81	1749,89	8,10
Phase 25	7,195	1,795	7,78	33375,17	11601,36	1749,89	6,63
Phase 26	7,195	1,795	7,78	33724,77	11722,88	1749,89	6,70
Phase 27	7,195	1,795	7,78	42014,77	14604,53	1749,89	8,35
Phase 28	7,195	1,795	7,78	41320,97	14363,36	1749,89	8,21
Phase 29	7,195	1,795	7,78	33370,47	11599,73	1749,89	6,63
Phase 30	7,195	1,795	7,78	33369,27	11599,31	1749,89	6,63
Phase 31	7,195	1,795	7,78	41869,17	14553,91	1749,89	8,32
Phase 32	7,195	1,795	7,78	47729,37	16590,95	1749,89	9,48

D'où :

10 Câbles inférieurs nécessaires pour reprendre les efforts agissants sur la travée en phase de poussage.

V.3.1.2.2 Tronçon 1

Situé entre la culée C-1 et la pile P-23, avec une longueur de 918.00m. Le nombre de câbles nécessaire pour reprendre les efforts agissants sur le tablier en cours de poussage sera calculé de la même manière que le tronçon 3.

Vu le nombre important de phase de poussage (69 phase de poussage) pour ce tronçon, on se limite à présenter que les cas les plus défavorables pour l'hourdis supérieur et inférieur.

Tableau V.4: Calcul des câbles pour le parement Supérieur en cours de poussage

Phase	S	e_s	I/V	M_{max} (kN.m)	P (kN)	P_u (kN)	N
phase 56	7,195	1,185	5,29	64532,42	33605,09	1749,89	19,20

D'où :

20 Câbles supérieurs nécessaires pour reprendre les sollicitations agissantes sur l'appui en phase de poussage.

Tableau V.5: Calcul des câbles pour le parement inférieur en cours de poussage

Phase	S	e_i	I/V'	M_{max} (kN.m)	P (kN)	P_u (kN)	N
phase 57	7,195	1,795	7,784	43400,16	15086,09	1749,89	8,62

D'où :

10 Câbles inférieurs nécessaires pour reprendre les sollicitations agissantes sur la travée en phase de poussage.

V.3.1.3. Vérification des contraintes en phase de poussage

V.3.1.3.1 Tronçon 3

La vérification des contraintes se fera lorsque le tablier est en cours de poussage, et ce au niveau de l'appui et en travée.

Les contraintes dans les fibres supérieures σ_{Sup} et inférieures σ_{Inf} seront vérifiées comme suit :

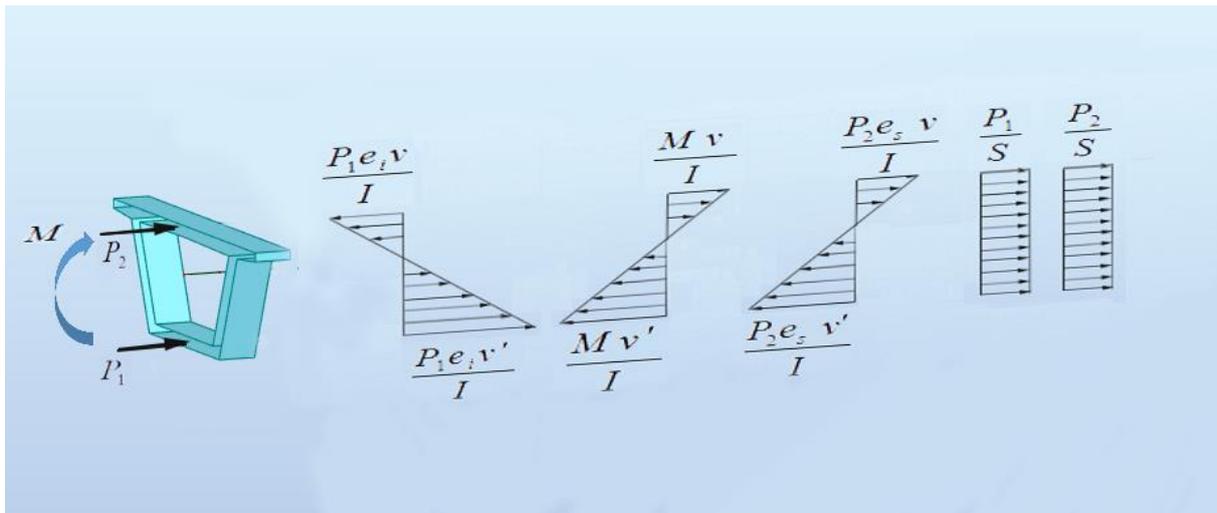


Figure V.4: Vérification des contraintes

Sur Appui

$$\sigma_{Sup} = \frac{P_2 e_s v}{I} - \frac{P_1 e_i v}{I} - \frac{M v}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} \geq 0$$

$$\sigma_{Inf} = \frac{P_1 e_i v'}{I} - \frac{P_2 e_s v'}{I} + \frac{M v'}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} \leq 0.6 f_{c28}$$

En travée

$$\sigma_{Sup} = \frac{P_2 e_s v}{I} - \frac{P_1 e_i v}{I} + \frac{M v}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} \leq 0.6 f_{c28}$$

$$\sigma_{Inf} = \frac{P_1 e_i v'}{I} - \frac{P_2 e_s v'}{I} - \frac{M v'}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} \geq 0$$

Avec :

M : Moment total agissant sur la section en cours de poussage

$$M = M_G + M_D + M_{\Delta T}$$

P_1 : L'effort de la précontrainte agissant à l'intérieur de l'hourdis inférieur, engendré par 10 câbles de poussage.

P_2 : L'effort de la précontrainte agissant à l'intérieur de l'hourdis supérieur, engendré par 20 câbles de poussage.

e_i : L'excentricité de l'effort P_1 par rapport au centre de gravité de la section.

$$e_i = 1.795 \text{ m}$$

e_s : L'excentricité de l'effort P_2 par rapport au centre de gravité de la section.

$$e_s = 1.185 \text{ m}$$

Tableau V.6: Vérifications des contraintes supérieures et inférieures sur appui et en travée, lors de construction de Tronçon 3

Phase	P ₂ (N=20)	P ₁ (N=10)	M _{Travée}	M _{Appui}	e _i	e _s	En travée		Sur appui	
							σ_{Sup}	σ_{Inf}	σ_{Sup}	σ_{Inf}
Phase 1	34997,8	17498,9	11364,6	31207,6	1,795	1,185	10,05	3,25	4,58	11,29
Phase 2	34997,8	17498,9	37886,3	16779,9	1,795	1,185	13,46	-1,77	6,43	8,57
Phase 3	34997,8	17498,9	42443,9	23020,5	1,795	1,185	14,04	-2,63	5,63	9,75
Phase 4	34997,8	17498,9	41702,7	25943,7	1,795	1,185	13,95	-2,49	5,26	10,30
Phase 5	34997,8	17498,9	35616,1	40868,1	1,795	1,185	13,16	-1,34	3,34	13,12
Phase 6	34997,8	17498,9	30214,3	55038,0	1,795	1,185	12,47	-0,32	1,52	15,80
Phase 7	34997,8	17498,9	32735,1	50994,1	1,795	1,185	12,79	-0,79	2,04	15,03
Phase 8	34997,8	17498,9	31913,8	50764,3	1,795	1,185	12,69	-0,64	2,07	14,99
Phase 9	34997,8	17498,9	15487,3	33249,3	1,795	1,185	10,58	2,47	4,32	11,68
Phase10	34997,8	17498,9	34332,8	51915,8	1,795	1,185	13,00	-1,09	1,92	15,21
Phase11	34997,8	17498,9	34395,9	46982,1	1,795	1,185	13,01	-1,11	2,55	14,27
Phase12	34997,8	17498,9	33411,0	46250,4	1,795	1,185	12,88	-0,92	2,65	14,14
Phase13	34997,8	17498,9	33800,3	47005,2	1,795	1,185	12,93	-0,99	2,55	14,28
Phase14	34997,8	17498,9	33083,8	53018,1	1,795	1,185	12,84	-0,86	1,78	15,41
Phase15	34997,8	17498,9	33935,5	48309,8	1,795	1,185	12,95	-1,02	2,38	14,52
Phase16	34997,8	17498,9	33216,5	48060,1	1,795	1,185	12,86	-0,88	2,41	14,48
Phase17	34997,8	17498,9	33449,3	58503,6	1,795	1,185	12,89	-0,93	1,07	16,45
Phase18	34997,8	17498,9	33487,2	63655,2	1,795	1,185	12,89	-0,93	0,41	17,42
Phase19	34997,8	17498,9	43350,6	55878,4	1,795	1,185	14,16	-2,80	1,41	15,96
Phase20	34997,8	17498,9	42687,4	55385,8	1,795	1,185	14,07	-2,67	1,47	15,86
Phase21	34997,8	17498,9	33360,2	57926,3	1,795	1,185	12,87	-0,91	1,15	16,34
Phase22	34997,8	17498,9	33342,9	66210,2	1,795	1,185	12,87	-0,91	0,08	17,91
Phase23	34997,8	17498,9	41456,8	59707,9	1,795	1,185	13,91	-2,44	0,92	16,68
Phase24	34997,8	17498,9	40752,7	59265,4	1,795	1,185	13,82	-2,31	0,97	16,60
Phase25	34997,8	17498,9	33375,2	58926,3	1,795	1,185	12,88	-0,91	1,02	16,53
Phase26	34997,8	17498,9	33724,8	65163,3	1,795	1,185	12,92	-0,98	0,22	17,71
Phase27	34997,8	17498,9	42014,8	58401,9	1,795	1,185	13,99	-2,55	1,09	16,43
Phase28	34997,8	17498,9	41321,0	57943,6	1,795	1,185	13,90	-2,41	1,14	16,35
Phase29	34997,8	17498,9	33370,5	57780,5	1,795	1,185	12,88	-0,91	1,17	16,31
Phase30	34997,8	17498,9	33369,3	65284,1	1,795	1,185	12,88	-0,91	0,20	17,73
Phase31	34997,8	17498,9	41869,2	58589,4	1,795	1,185	13,97	-2,52	1,06	16,47
Phase32	34997,8	17498,9	47729,4	61831,9	1,795	1,185	14,72	-3,63	0,65	17,08

A partir du *Tableau V.6*, on remarque que les fibres inférieures en travée subissent une traction en phase de construction. Cette traction est due à l'influence du moment créé par les câbles supérieurs, tandis que les câbles inférieurs sont destinés à reprendre uniquement les sollicitations extérieures en construction, puis une partie des charges en service une fois le tablier est à sa position finale.

Afin de remédier à ce problème on propose d'ajouter des câbles provisoires au niveau de hourdis inférieur, détendus à la fin de poussage, en gardant toujours le nombre de câbles supérieurs (20 câbles). Mais aussi on diminue la sévérité de la classe 1 en situation d'exécution, en admettant des tractions limitées à $0.7 f_{t28}$. [6]

$$\sigma_{inf} = \frac{P_1 e_i v'}{I} - \frac{P_2 e_s v'}{I} - \frac{M v'}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} \geq 0.7 f_{t28} = 2.1 \text{ Mpa}$$

$$P_1 \geq \frac{\frac{M v'}{I} + \frac{P_2 e_s v'}{I} - \frac{P_2}{S} - 2,1 \cdot 10^3}{\frac{e_i v'}{I} + \frac{1}{S}}$$

$$N \geq \frac{P_1}{P_u} = 11.82 \text{ Câbles}$$

D'où :

12 Câbles inférieurs nécessaires pour reprendre les sollicitations agissant sur la travée en construction, dont 2 câbles provisoires qui seront détendus à la fin poussage.

Vérification

Tableau V.7: Vérification des contraintes supérieures et inférieures pour la section la plus tendue en construction

Phase	P ₂ (N=20)	P ₁ (N=12)	M _{Travée}	M _{Appui}	e _i	e _s	En travée		Sur appui	
							σ_{Sp}	σ_{Inf}	σ_{Sp}	σ_{Inf}
Phase32	34997,7	20998,6	47729,3	61831,9	1,79	1,18	14,4	-1,9	0,32	18,7

$$\sigma_{Inf} > 0.7 f_{t28} \text{ (vérifié)}$$

V.3.1.3.2 Tronçon 1

Dans cette partie du tablier, la vérification des contraintes en cours construction se fera de la même manière que le tronçon 3.

Vu qu'on a rencontré le problème de traction des fibres inférieures en construction, on propose la même solution que le tronçon 3, c'est-à-dire ajouter des câbles provisoires au niveau du hourdis inférieur, détendus à la fin de poussage, en gardant toujours le nombre de câbles supérieurs (20 câbles). Mais aussi on diminue la sévérité de la classe 1 en situation d'exécution, en admettant des tractions limitées à $0.7 f_{t28}$. [6]

V.3.1.4. Répartition de la précontrainte de poussage

La précontrainte de poussage sera répartie comme suit :

Sur appui

- 20 Câbles définitifs logés dans le hourdis supérieur (10 câbles de chaque côtés) tendus de déviateur à déviateur, et ancrés dans les bossages.
- 12 Câbles provisoires logés dans le hourdis inférieur (6 câbles de chaque côtés) tendus de déviateur à déviateur, et ancrés dans les bossages.

En travée

- 10 Câbles définitifs logés dans le hourdis inférieur (5 câbles de chaque côtés) tendus de déviateur à déviateur, et ancrés dans les bossages.
- 2 Câbles provisoires logés dans le hourdis inférieur (1 câbles de chaque côtés) tendus de déviateur à déviateur, et ancrés dans les bossages.
- 20 Câbles provisoires logés dans le hourdis supérieur (10 câbles de chaque côtés) tendus de déviateur à déviateur, et ancrés dans les bossages.

V.3.2. Précontrainte de Continuité

V.3.2.1. Tracé de Câblage

La précontrainte de continuité est constituée de câbles extérieurs localisés en-dehors de la masse de béton mais toujours à l'intérieur de caisson. Ils suivent un tracé trapézoïdal, dévié au quart de la travée à l'aide de deux entretoises déviateur.

Pour cela on calcule d'abord les excentricités e_1, e_2, e_3 servant comme point de déviation pour les câbles extérieurs.

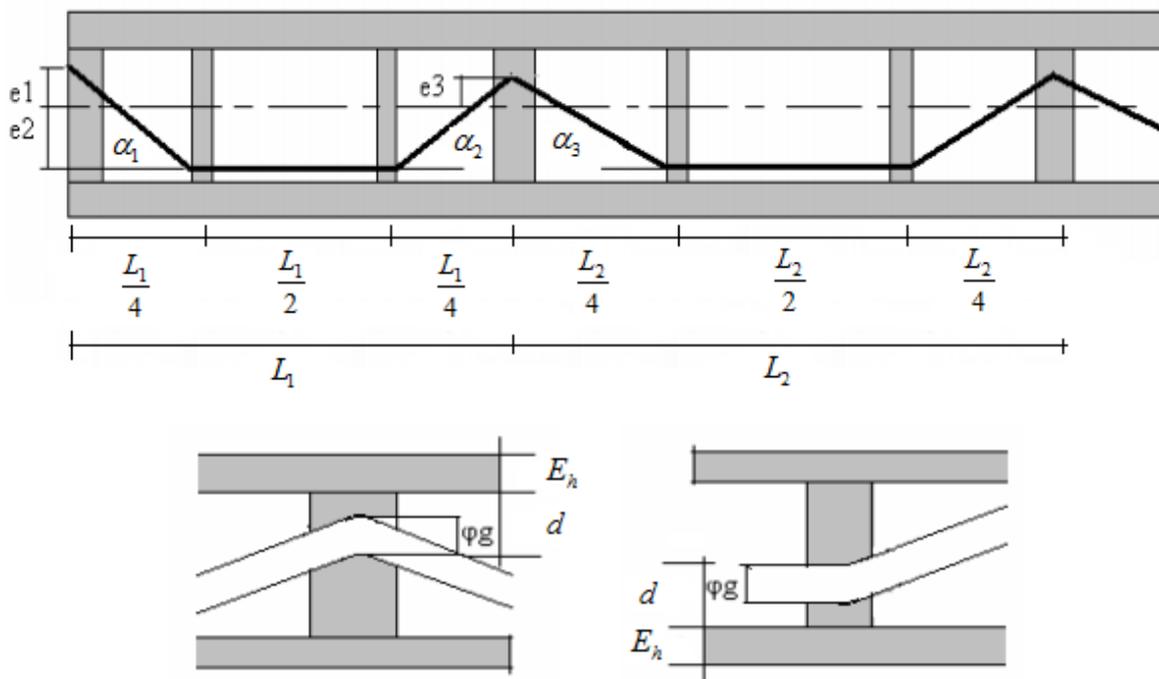


Figure V.5: Tracé de câblage extérieur [9]

Avec :

E_h : Epaisseur de l'hourdis supérieur ou inférieur

φ_g : Diamètre de la gaine recouvrant le câble extérieur

d : Distance imposée par les dispositions constructives de la précontrainte, sert à faciliter la mise en œuvre de l'ancrage et des câbles.

Calcul des excentricités

$$e_1 \leq \rho v = \frac{I}{Sv'} = 0.7353 \text{ m}$$

$$e_2 = v' - E_h - d - \frac{\varphi_g}{2} = 1.4425 \text{ m}$$

$$e_3 = v - E_h - d - \frac{\varphi_g}{2} = 0.7925 \text{ m}$$

D'où : les angles de déviation se calculent comme suit :

$$\tan(\alpha_1) = \frac{e_1 + e_2}{\frac{L_1}{4}} = 0.329 \text{ rad} ; \quad \tan(\alpha_2) = \frac{e_2 + e_3}{\frac{L_1}{4}} = 0.337 \text{ rad} \quad \tan(\alpha_3) = \frac{e_2 + e_3}{\frac{L_2}{4}} = 0.248 \text{ rad}$$

V.3.2.2. Effet de la précontrainte sur la structure

La composante verticale de la précontrainte extérieure permet le renforcement vis-à-vis de l'effort tranchant, mais également elle crée un effet favorable sur le tablier.

Pour montrer l'effet de la précontrainte sur la structure, on applique l'effort d'un seul câble extérieur sur une barre avec les caractéristiques : masse négligeable, section de voussoir et une longueur de la travée. Et cela en utilisant le logiciel **Robot Structural Analysis**.

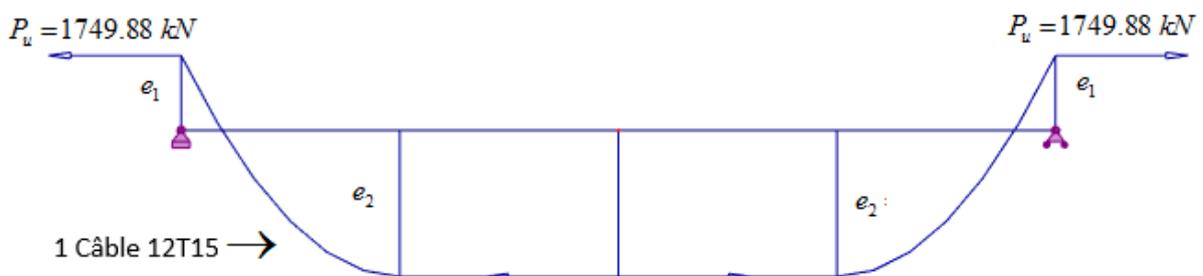


Figure V.6: Effort d'un seul câble sur une travée de la structure

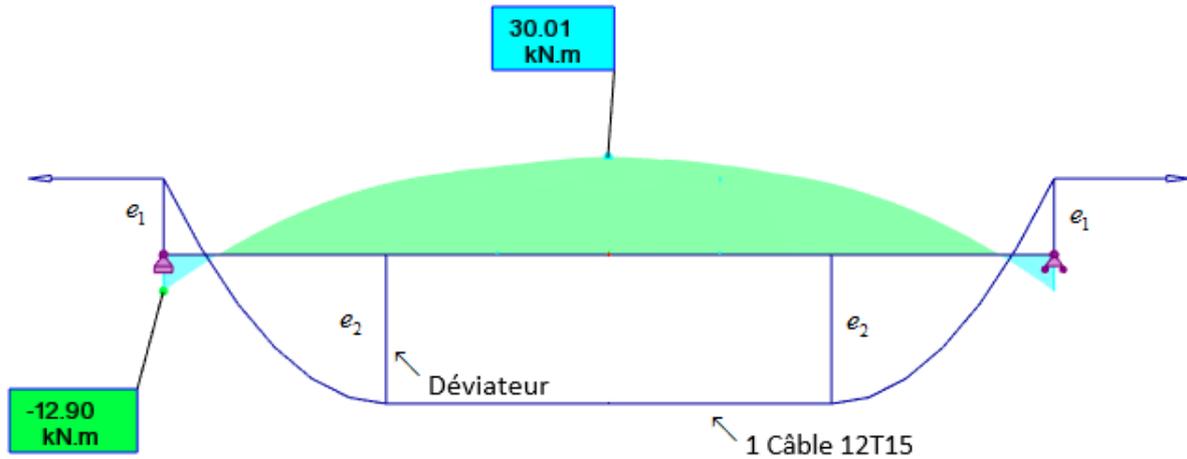


Figure V.7: Les moments dus à l'effet d'un seul câble de précontrainte

D'où :

Le moment dû à l'effet de la précontrainte engendré par l'ensemble des câbles extérieurs est égale au nombre de câbles extérieurs multiplié par le moment dû à l'effet d'un seul câble de précontrainte.

$$M_p = N \times m_p$$

Avec

M_p : Moment dû à l'effet de la précontrainte engendré par l'ensemble des câbles extérieurs.

m_p : Moment dû à l'effet d'un seul câble de précontrainte.

N : Nombre de câbles extérieurs (câbles de continuité).

V.3.2.3. Calcul du nombre de câbles

V.3.2.3.1 Tronçon 1 et Tronçon 3

Au niveau des tronçons 1 et 3, le câblage complémentaire est destiné à reprendre une partie des charges en service. Donc les câbles seront dimensionnés avec un moment réduit, car les moments dus aux efforts de poussage sont déjà repris par les câbles de poussage ; mais aussi on tient compte de l'effet de la précontrainte sur la structure.

$$M = M_{ser} - M_{pouss} + M_p$$

Avec :

M : Moment fléchissant agissant sur la section.

M_{ser} : Moment maximal en phase de service.

M_{pouss} : Moment maximal total en phase de poussage.

M_p : Moment dû à l'effet de la précontrainte engendré par l'ensemble des câbles extérieurs. ($M_p = N \times m_p$)

Le nombre de câbles nécessaire dans cette partie est :

Sur appui

$$\frac{p}{S} + \frac{Pe_s v}{I} - \frac{Mv}{I} \geq 0$$

$$\frac{NP_u}{S} + \frac{NP_u e_s v}{I} - \frac{M_{ser} v}{I} + \frac{M_{pouss} v}{I} + \frac{Nm_p v}{I} \geq 0$$

D'où :

$$N \geq \frac{\frac{M_{ser} v}{I} - \frac{M_{pouss} v}{I}}{\frac{P_u}{S} + \frac{P_u e_s v}{I} + \frac{m_p v}{I}}$$

En travée

$$\frac{p}{S} + \frac{Pe_i v'}{I} - \frac{Mv'}{I} \geq 0$$

$$\frac{NP_u}{S} + \frac{NP_u e_i v'}{I} - \frac{M_{ser} v'}{I} + \frac{M_{pouss} v'}{I} + \frac{Nm_p v'}{I} \geq 0$$

D'où :

$$N \geq \frac{\frac{M_{ser} v'}{I} - \frac{M_{pouss} v'}{I}}{\frac{P_u}{S} + \frac{P_u e_i v'}{I} + \frac{m_p v'}{I}} :$$

e_s : L'excentricité du câble supérieur par rapport au centre de gravité.

$$e_s = e_3 = 0.7925 \text{ m}$$

e_i : L'excentricité du câble inférieur par rapport au centre de gravité.

$$e_i = e_2 = 1.4425 \text{ m}$$

Tableau V.8: Calcul des câbles pour le parement Supérieur en service

Section	S	e_s	I/V	$M_{\text{Appui}}(\text{kN.m})$	P_u (kN)	N
Appui	7,195	0,7925	7,78	33535,98	1749,88	10,19

Tableau V.9: Calcul des câbles pour le parement Inférieur en service

Section	S	e_i	I/V'	$M_{\text{Travée}}(\text{kN.m})$	P_u (kN)	N
Travée	7,195	1,4425	5,29	19978,02	1749,88	5,23

D'où :

12 Câbles de continuité nécessaires pour reprendre les sollicitations agissantes sur le tablier en phase de service pour les tronçons 1 et 3.

V.3.2.3.2 Tronçon 2

Situé entre la pile P-23 et la pile P-27, avec une longueur de 166.5 m. Ce tronçon de transition est exécuté sur place à l'aide des cintres. Le câblage extérieur est destiné à reprendre toutes les sollicitations agissant sur cette partie du viaduc.

$$M = M_{ser} + M_p$$

Le nombre de câbles nécessaire sera calculé de la même manière que les tronçons 1 et 3.

Tableau V.10: Calcul des câbles pour le parement Supérieur

Section	S	e_s	I/V	$M_{\text{Appui}}(\text{kN.m})$	P_u (kN)	N
Appui	7,195	0,7925	7,78	98068,38	1749,88	29,80

Tableau V.11: Calcul des câbles pour le parement inférieur

Section	S	e_i	I/V'	$M_{\text{Travée}}(\text{kN.m})$	P_u (kN)	N
Travée	7,195	1,4425	5,29	63378,18	1749,88	16,58

D'où :

30 Câbles sont nécessaires pour reprendre les sollicitations agissant sur le tronçon 2 de l'ouvrage.

V.3.2.4. Vérification des contraintes en phase de service

V.3.2.4.1 Tronçon 1 et Tronçon 3

La vérification des contraintes se fera pour les sections dangereuses (appui et mi- travée), et ce lorsque le viaduc est à vide et en charge.

Appui

$$\sigma_{Sup} = \frac{P_1 e_1 v}{I} + \frac{P_2 e_2 v}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} + \frac{M_p v}{I} - \frac{M_{ser} v}{I} \geq 0$$

$$\sigma_{Inf} = -\frac{P_1 e_1 v'}{I} - \frac{P_2 e_2 v'}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} - \frac{M_p v'}{I} + \frac{M_{ser} v'}{I} \leq 0.6 f_{c28}$$

Travée

$$\sigma_{Sup} = -\frac{P_1 e_1 v}{I} - \frac{P_2 e_2 v}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} - \frac{M_p v}{I} + \frac{M_{ser} v}{I} \leq 0.6 f_{c28}$$

$$\sigma_{Inf} = \frac{P_1 e_1 v'}{I} + \frac{P_2 e_2 v'}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} + \frac{M_p v'}{I} - \frac{M_{ser} v'}{I} \geq 0$$

Avec :

P_1 : L'effort de précontrainte engendré par les câbles de poussage définitifs.

e_1 : L'excentricité des câbles de poussage définitifs par rapport au centre de gravité.

P_2 : L'effort de précontrainte engendré par les câbles extérieurs (câbles de continuité).

e_2 : L'excentricité des câbles extérieurs par rapport au centre de gravité.

M_p : Moment dû à l'effet de la précontrainte engendré par l'ensemble des câbles extérieurs. ($M_p = N \times m_p$).

M_{ser} : Moment maximal en phase de service.

A vide les contraintes seront vérifiées avec le moment dû aux charges permanentes M_g .

Tableau V.12: Vérification des contraintes Supérieures et inférieures en phase de service pour les tronçons 1 et 3

	Appui		Travée	
	A vide	En charge	A vide	En charge
I	10,08	10,08	10,08	10,08
S	7,195	7,195	7,195	7,195
V	1,295	1,295	1,295	1,295
V'	1,905	1,905	1,905	1,905
N₁	20	20	10	10
e₁	1,185	1,185	1,795	1,795
P₁	34997,76	34997,76	17498,88	17498,88
N₂	12	12	12	12
e₂	0,7925	0,7925	1,4425	1,4425
P₂	20998.66	20998.66	20998.66	20998.66
M_{ser}	98068,38	98068,38	63378,18	63378,18
M_g	58617,17	58617,17	35392,31	35392,31
σ_{Sup} (Mpa)	7,74	2,67	1,92	5,52
σ_{Inf} (Mpa)	7,85	15,31	10,39	5,10

V.3.2.4.2 Tronçon 2

Appui

$$\sigma_{Sup} = \frac{P_2 e_2 v}{I} + \frac{P_2}{S} + \frac{M_p v}{I} - \frac{M_{ser} v}{I} \geq 0$$

$$\sigma_{Inf} = -\frac{P_2 e_2 v'}{I} + \frac{P_2}{S} - \frac{M_p v'}{I} + \frac{M_{ser} v'}{I} \leq 0.6 f_{c28}$$

Travée

$$\sigma_{Sup} = -\frac{P_2 e_2 v}{I} + \frac{P_2}{S} - \frac{M_p v}{I} + \frac{M_{ser} v}{I} \leq 0.6 f_{c28}$$

$$\sigma_{Inf} = \frac{P_1 e_1 v'}{I} + \frac{P_2 e_2 v'}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} + \frac{M_p v'}{I} - \frac{M_{ser} v'}{I} \geq 0$$

Tableau V.13: Vérification des contraintes Supérieures et inférieures en phase de service pour le tronçon2

	Appui		Travée	
	A vide	En charge	A vide	En charge
I	10,08	10,08	10,08	10,08
S	7,195	7,195	7,195	7,195
V	1,295	1,295	1,295	1,295
V'	1,905	1,905	1,905	1,905
N₂	30	30	30	30
e₂	0,7925	0,7925	1,4425	1,4425
P₂	52496,64	52496,64	52496,64	52496,64
M_{Ser}	98068,38	98068,38	63378,18	63378,18
M_g	58617,17	58617,17	35392,31	35392,31
σ_{sup} (Mpa)	5,16	0,088	1,999	5,59
σ_{Inf} (Mpa)	10,44	17,90	15,09	9,80

V.3.2.5. Répartition de la précontrainte de continuité

La précontrainte extérieure se répartie comme suit :

Tronçon 1 et 3

12 Câbles extérieurs, tendus d'entretoise à l'entretoise suivant un tracé trapézoïdal.

Tronçon 2

30 Câbles extérieurs, tendus d'entretoise à l'entretoise suivant un tracé trapézoïdal.

V.4. Les Pertes de la précontrainte

Cette partie consiste à évaluer la différence entre la tension d'une armature, exercée par le vérin lors de la mise en œuvre, et sa tension à un point donné du tracé.

Les pertes se distinguent en deux catégories, des pertes instantanées dues :

- Aux frottements du câble sur sa gaine ;
- Au recul des ancrages ;
- À la non-simultanéité des mises en tension des différentes familles de câbles,

Des pertes déferées qui s'y ajoutent au cours du temps, dues :

- Au retrait du béton ;
- À la relaxation des aciers ;
- Au fluage du béton.

V.4.1. Calcul des pertes pour la précontrainte de continuité

V.4.1.1. Perte par frottement

Lors de la mise en tension, le câble se plaque contre la génératrice intérieure de la gaine dans les parties courbes de son tracé (le câble tend à se mettre en ligne droite). Du fait du déplacement du câble sous l'action du vérin, se produit un frottement entre le câble et la gaine qui réduit la tension dans le câble à partir de son ancrage. [10]

Les pertes par frottement peuvent être calculées par la relation suivante :

$$\Delta\sigma_f(x) = \sigma_{p0} \times (f \cdot \alpha(x) + \varphi \cdot x)$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} \alpha(x) : \text{la somme des déviations dans les deux plans entre l'origine} \\ \quad \text{du cable et le point où l'on calcule la tension;} \\ f : \text{coefficient de frottement en courbe (en rd}^{-1}\text{);} \\ x : \text{longueur du cable entre l'origine et la section étudiée;} \\ \varphi : \text{coefficient de frottement par unité de longueur (en m}^{-1}\text{);} \\ \sigma_{p0} : \text{tension à l'encrage.} \end{array} \right.$$

$f = 0,12$ et $\varphi = 0$; Pour une déviation dans un tube PEHD (Polyéthylène à Haute Densité)

Tableau V.14: Pertes dues au frottement

Section	X(m)	$\alpha_i(x)$	$\sum_{i=1} \alpha_i(x)$	f	ΔF_{fro} (kN)	$\Delta F/P_0$
Culée 1	0,00	0,329	0,329	0,12	96,78	3,87%
Déviateur1	6,63	0,329	0,658	0,12	189,81	7,59%
Déviateur2	19,88	0,337	0,995	0,12	281,46	11,26%
Appui 1	26,50	0,337	1,333	0,12	369,47	14,78%
Appui 1	26,50	0,248	0,248	0,12	73,40	2,94%
Déviateur1	35,50	0,248	0,497	0,12	144,64	5,79%
Déviateur2	53,50	0,248	0,745	0,12	213,79	8,55%
Appui 2	62,50	0,248	0,993	0,12	280,91	11,24%
Appui 2	62,50	0,248	0,248	0,12	73,40	2,94%
Déviateur1	71,50	0,248	0,497	0,12	144,64	5,79%
Déviateur2	89,50	0,248	0,745	0,12	213,79	8,55%
Appui 3	98,50	0,248	0,993	0,12	280,91	11,24%
Appui 3	98,50	0,237	0,237	0,12	70,04	2,80%
Déviateur1	107,94	0,237	0,474	0,12	138,12	5,53%
Déviateur2	126,81	0,237	0,710	0,12	204,29	8,17%
Appui 4	136,25	0,237	0,947	0,12	268,61	10,75%
Appui 4	136,25	0,347	0,347	0,12	102,01	4,08%
Déviateur	142,69	0,347	0,694	0,12	199,86	7,99%
Déviateur2	155,56	0,347	1,042	0,12	293,71	11,75%
Appui 5	162,00	0,347	1,389	0,12	383,73	15,35%
Appui 5	162,00	0,347	0,347	0,12	102,01	4,08%
Déviateur1	168,44	0,347	0,694	0,12	199,86	7,99%
Déviateur2	181,31	0,347	1,042	0,12	293,71	11,75%
Appui 6	187,75	0,347	1,389	0,12	383,73	15,35%
Appui 6	187,75	0,347	0,347	0,12	102,01	4,08%
Déviateur1	194,19	0,347	0,694	0,12	199,86	7,99%
Déviateur2	207,06	0,347	1,042	0,12	293,71	11,75%
Appui 7	213,50	0,347	1,389	0,12	383,73	15,35%
Appui 7	213,50	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	225,56	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	249,69	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 8	261,75	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 8	261,75	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	273,81	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	297,94	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 9	310,00	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 9	310,00	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	322,06	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%

La suite du tableau présentant les pertes dues au frottement, est donnée dans l'annexe B.1.

V.4.1.2. Pertes dues au recul d'ancrage

Lors du transfert de l'effort de tension du vérin à l'ancrage, il se produit un léger mouvement du câble vers le béton ; ce mouvement dépend du type d'ancrage utilisé. Il peut être pratiquement nul, négligeable, ou important.

Le déplacement g du câble vers l'intérieur de la gaine est gêné par les forces de frottement. A une distance λ , la somme des efforts de frottement équilibre la perte de tension due au glissement du câble et il n'y a plus de déplacement de l'armature par rapport à sa gaine. Le recul d'ancrage ne produit pas de perte de tension au-delà de la section située à l'abscisse λ . [10]

La perte par recul d'ancrage peut être calculée comme suit :

$$\Delta\sigma_g(x) = \sigma_0 - \sigma_2 = \sigma_0 \cdot 2 \cdot \psi \cdot \lambda$$

$$\text{Avec :} \quad \sigma_2 = \sigma_0(1 - 2\psi\lambda) \quad \lambda = \sqrt{\frac{g \cdot E_p}{\sigma_0 \cdot \psi}} \quad \psi = f \cdot \frac{\alpha}{L} + \varphi$$

λ : Longueur d'influence du glissement.

g : L'intensité de recul d'ancrage égale à 6 mm

L : Longueur du câble

E_a : Module d'élasticité de l'acier égale à 190000MPa

σ_0 : Contrainte à l'ancrage

f : Coefficient de frottement en courbe (0.12 rd⁻¹) ;

φ : Coefficient de perte de tension par unité de longueur ($\varphi = 0$).

Dans notre cas, le câble subit plusieurs déviations en suivant le tracé trapézoïdal.

D'où :

$$\psi = f \cdot \frac{\sum \alpha}{L}$$

Tableau V.15: Pertes dues au recul d'ancrage

Section	L (m)	$\alpha_i(x)$	$\sum_{i=1} \alpha_i(x)/L$	f	ψ	λ	ΔF (kN)	$\Delta F/P_0$
Culée 1	26,50	0,329	0,0503	0,12	0,0060	11,44	345,29	13,81%
Déviateur1		0,329					145,39	5,82%
Déviateur2		0,337					0,00	0,00%
Appui 1		0,337					0,00	0,00%
Appui 1	36,00	0,248	0,0276	0,12	0,0033	15,45	255,76	10,23%
Déviateur1		0,248					106,77	4,27%
Déviateur2		0,248					0,00	0,00%
Appui 2		0,248					0,00	0,00%
Appui 2	36,00	0,248	0,0276	0,12	0,0033	15,45	255,76	10,23%
Déviateur1		0,248					106,77	4,27%
Déviateur2		0,248					0,00	0,00%
Appui 3		0,248					0,00	0,00%
Appui 3	37,75	0,237	0,0251	0,12	0,0030	16,20	243,90	9,76%
Déviateur1		0,237					101,82	4,07%
Déviateur2		0,237					0,00	0,00%
Appui 4		0,237					0,00	0,00%
Appui 4	25,75	0,347	0,0539	0,12	0,0065	11,05	357,57	14,30%
Déviateur1		0,347					149,27	5,97%
Déviateur2		0,347					0,00	0,00%
Appui 5		0,347					0,00	0,00%
Appui 5	25,75	0,347	0,0539	0,12	0,0065	11,05	357,57	14,30%
Déviateur1		0,347					149,27	5,97%
Déviateur2		0,347					0,00	0,00%
Appui 6		0,347					0,00	0,00%
Appui 6	25,75	0,347	0,0539	0,12	0,0065	11,05	357,57	14,30%
Déviateur1		0,347					149,27	5,97%
Déviateur2		0,347					0,00	0,00%
Appui 7		0,347					0,00	0,00%
Appui 7	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0,00	0,00%
Appui 8		0,185					0,00	0,00%
Appui 8	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0,00	0,00%
Appui 9		0,185					0,00	0,00%

La suite du tableau présentant les pertes dues au recul d'ancrage, est donnée dans l'annexe B.2.

V.4.1.3. Pertes dues au non simultanéité des mises en tension

Très souvent, une poutre comporte plusieurs câbles. Les tracés individuels des armatures sont généralement différents ; Le fait de ne pas tendre en même temps tous les câbles d'une même poutre provoque une perte de tension.

En effet, une fois le premier câ  ble tendu et ancré, la mise en tension du deuxième câ  ble provoque un raccourcissement du béton. Le premier câ  ble mis en tension subit la même déformation, ce qui provoque une baisse de sa tension. Si la poutre comporte **N** câbles, le premier câ  ble subit l'effet des **(N-1)** câbles suivants et ainsi de suite. Seul le dernier câ  ble ne subit pas ce type de perte. [10]

Les pertes dues à la Non simultanéité des mises en tension se calculent comme suit :

$$\Delta\sigma_{P_i} = \frac{N-1}{2N} \times \frac{\sigma_b}{E_{bi}} \times E_p$$

Avec

$\sigma_b(x)$: Contrainte du béton au centre de gravité des câbles, calculée comme suit :

$$\sigma_b(x) = \frac{P}{S} + \frac{P e^2}{I} - \frac{M e}{I}$$

$$P = P_0 N (1 - \Delta F_{Fro} - \Delta F_{Anc})$$

E_{bi} : Module de déformation longitudinale du béton à l'âge t.

A t=28j

$$E_{b28} = 11000 \sqrt[3]{f_{c28}} = 37619.47 \text{ Mpa}$$

E_p : Module d'élasticité d'acier

($E_p = 19 \times 10^4$ MPa)

e : Excentricité des câbles.

M : Moment dû au poids propre.

N : Nombre de câbles.

$$N = \begin{cases} \text{Tronçon 1 et 3} \rightarrow 12 \text{ Cables} \\ \text{Tronçon 2} \rightarrow 30 \text{ Cables} \end{cases}$$

Tableau V.16: Pertes dues au non simultanété des mises en tension

Section	ΔF_{Fr}	ΔF_{anc}	P	M	$\sigma_b(x)$	ΔF (kN)	$\Delta F/P_0$
Cul��e 1	96,78	345,29	24693,25	0,00	4,76	11,03	0,44%
D��viateur1	96,78	145,39	27092,06	7222,91	10,39	24,05	0,96%
D��viateur2	99,18	0,00	28807,92	-1588,41	9,72	22,51	0,90%
Appui 1	99,18	0,00	28807,92	-17599,25	7,18	16,63	0,67%
Appui 1	73,40	255,76	26048,22	-17599,25	6,63	15,34	0,61%
D��viateur1	73,40	106,77	27836,10	3523,53	10,12	23,42	0,94%
D��viateur2	73,40	0,00	29117,33	2879,01	10,47	24,23	0,97%
Appui 2	73,40	0,00	29117,33	-18888,30	7,35	17,00	0,68%
Appui 2	73,40	255,76	26048,22	-18888,30	6,73	15,57	0,62%
D��viateur1	73,40	106,77	27836,10	1973,54	9,90	22,91	0,92%
D��viateur2	73,40	0,00	29117,33	807,12	10,17	23,55	0,94%
Appui 3	73,40	0,00	29117,33	-21221,14	7,53	17,43	0,70%
Appui 3	70,04	243,90	26230,74	-21221,14	6,95	16,08	0,64%
D��viateur1	70,04	101,82	27935,75	3541,96	10,16	23,51	0,94%
D��viateur2	70,04	0,00	29157,58	5909,53	10,92	25,27	1,01%
Appui 4	70,04	0,00	29157,58	-16487,79	7,16	16,59	0,66%
Appui 4	102,01	357,57	24483,18	-16487,79	6,22	14,41	0,58%
D��viateur1	102,01	149,27	26982,75	-3658,50	8,80	20,36	0,81%
D��viateur2	102,01	0,00	28773,97	0,00	9,94	23,01	0,92%
Appui 5	102,01	0,00	28773,97	-9014,89	6,50	15,05	0,60%
Appui 5	102,01	357,57	24483,18	-9014,89	5,64	13,05	0,52%
D��viateur1	102,01	149,27	26982,75	2709,00	9,71	22,47	0,90%
D��viateur2	102,01	0,00	28773,97	4244,05	10,55	24,41	0,98%
Appui 6	102,01	0,00	28773,97	-5968,71	6,26	14,49	0,58%
Appui 6	102,01	357,57	24483,18	-5968,71	5,40	12,49	0,50%
D��viateur1	102,01	149,27	26982,75	85,85	9,33	21,60	0,86%
D��viateur2	102,01	0,00	28773,97	-9735,42	8,55	19,78	0,79%
Appui 7	102,01	0,00	28773,97	-25626,34	7,81	18,07	0,72%
Appui 7	54,97	190,83	27048,55	-25626,34	7,46	17,27	0,69%
D��viateur1	54,97	79,66	28382,52	10160,42	11,26	26,06	1,04%
D��viateur2	54,97	0,00	29338,46	4720,48	10,81	25,02	1,00%
Appui 8	54,97	0,00	29338,46	-36551,05	8,78	20,32	0,81%
Appui 8	54,97	190,83	27048,55	-36551,05	8,32	19,25	0,77%
D��viateur1	54,97	79,66	28382,52	2697,97	10,19	23,59	0,94%
D��viateur2	54,97	0,00	29338,46	4182,57	10,73	24,84	0,99%
Appui 9	54,97	0,00	29338,46	-33623,82	8,55	19,79	0,79%
Appui 9	54,97	190,83	27048,55	-33623,82	8,09	18,72	0,75%
D��viateur1	54,97	79,66	28382,52	4697,54	10,48	24,25	0,97%

La suite du tableau présentant les pertes dues au non simultanété des mises en tension, est donnée dans l'annexe B.3

La somme des pertes instantanées égale :

$$\Delta F_{Inst} = \Delta F_{frot} + \Delta F_{Anc} + \Delta F_{Non\ simul}$$

Tableau V.17: La somme des pertes instantanées

Section	ΔF_{frot} (kN)	ΔF_{anc} (kN)	ΔF_{simul} (kN)	Pertes Instantanées
Culée 1	96,78	345,29	11,03	18,12%
Déviateur1	189,81	145,39	24,05	14,37%
Déviateur2	281,46	0,00	22,51	12,16%
Appui 1	369,47	0,00	16,63	15,44%
Appui 1	73,40	255,76	15,34	13,78%
Déviateur1	144,64	106,77	23,42	10,99%
Déviateur2	213,79	0,00	24,23	9,52%
Appui 2	280,91	0,00	17,00	11,92%
Appui 2	73,40	255,76	15,57	13,79%
Déviateur1	144,64	106,77	22,91	10,97%
Déviateur2	213,79	0,00	23,55	9,49%
Appui 3	280,91	0,00	17,43	11,93%
Appui 3	70,04	243,90	16,08	13,20%
Déviateur1	138,12	101,82	23,51	10,54%
Déviateur2	204,29	0,00	25,27	9,18%
Appui 4	268,61	0,00	16,59	11,41%
Appui 4	102,01	357,57	14,41	18,96%
Déviateur1	199,86	149,27	20,36	14,78%
Déviateur2	293,71	0,00	23,01	12,67%
Appui 5	383,73	0,00	15,05	15,95%
Appui 5	102,01	357,57	13,05	18,91%
Déviateur1	199,86	149,27	22,47	14,86%
Déviateur2	293,71	0,00	24,41	12,73%
Appui 6	383,73	0,00	14,49	15,93%
Appui 6	102,01	357,57	12,49	18,88%
Déviateur1	199,86	149,27	21,60	14,83%
Déviateur2	293,71	0,00	19,78	12,54%
Appui 7	383,73	0,00	18,07	16,07%
Appui 7	54,97	190,83	17,27	10,52%
Déviateur1	108,73	79,66	26,06	8,58%
Déviateur2	161,31	0,00	25,02	7,45%
Appui 8	212,73	0,00	20,32	9,32%
Appui 8	54,97	190,83	19,25	10,60%
Déviateur1	108,73	79,66	23,59	8,48%

La suite du tableau présentant les pertes instantanées est donnée dans l'annexe B.4.

V.4.1.4. Pertes dues au retrait du Béton

Au cours de son durcissement, le béton subit une diminution de volume appelée retrait, ce qui va entraîner une diminution de la contrainte de traction des armatures de précontraintes ; elle se calcule comme suit :

$$\Delta\sigma_r = \varepsilon_r \times E_a$$

Avec

ε_r : Facteur dépendant du climat, égal à 1.5×10^{-4} pour les régions humides.

$$E_a = 19 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$\Delta F_r = 28.5 \text{ kN}$$

$$\frac{\Delta F_r}{P_0} = 1.14 \%$$

V.4.1.5. Pertes dues au fluage du béton

Les pertes dues au fluage est de même grandeur que celle dues au retrait, elles se calculent comme suit :

$$\Delta\sigma_{fl} = \frac{\sigma_b E_p K_{ft} f(t-t_i)}{E_{bj}}$$

Avec

K_{ft} : Coefficient de fluage, qui dépend notamment de l'âge du béton au moment où il subit la contrainte σ_{b0} .

$$K_{ft} = K_s \cdot (K_e + K_c \cdot K(t_0))$$

K_e : Coefficient représentant la limite inférieure du coefficient de fluage du béton non armé lorsqu'il est chargé, égal à 0,4.

K_c : Coefficient dépendant du durcissement du béton à l'âge de sa mise en charge.

$$K_c = \frac{120 - \rho_h}{30} + \frac{2(100 - \rho_h)}{3(20 + R_m)} = 1.702$$

ρ_h : Humidité relative moyenne 75%

$$R_m = \frac{2B}{P}, \begin{cases} B: \text{section du voussoir} \\ P: \text{Périmètre du voussoir} \end{cases}$$

$$K_s = \frac{1}{1+20\rho_s} = 0.91, \quad \text{avec : } \rho_s = \frac{A_s}{B} = 0.5\%$$

$K(t_0)$: Coefficient dépendant de la mise en charge.

t_0 : Age de béton, lors de mise en tension.

$$K(t_0) = \frac{100}{100+t_0}$$

$$K(28) = \frac{100}{100+28} = 0.78$$

$f(t-t_i)$: Une fonction de la durée du chargement, exprimée en jours, qui varie de 0 à 1 quand cette durée varie de 0 à l'infini.

$$f(t-t_i) = \frac{\sqrt{t-t_i}}{\sqrt{t-t_i} + 5\sqrt{R_m}}$$

$$f(\infty-28) = 1 - \frac{\sqrt{28-14}}{\sqrt{28-14} + 5\sqrt{R_m}} = 1 - 0.086 = 0.913$$

D'où :

$$K_{ft} = K_s \cdot (K_e + K_c \cdot K(t_0)) = 0,91 \cdot (0,4 + 1,702 \cdot 0,78) = 1,57$$

$$\Delta\sigma_{fl} = \frac{1,43 \cdot \sigma_b E_p}{E_{bj}}$$

σ_b : Contrainte subit par le béton au niveau du centre de gravité des câbles, sous l'effet des charges permanentes.

$$\sigma_b(x) = \frac{P}{S} + \frac{P e^2}{I} - \frac{M e}{I}$$

$$P = N \cdot P(1 - \Delta F_{Inst})$$

$$N = \begin{cases} \text{Tronçon 1 et 3} \rightarrow 12 \text{ Câbles} \\ \text{Tronçon 2} \rightarrow 30 \text{ Câbles} \end{cases}$$

Tableau V.18: Pertes dues au Fluage du béton

Section	ΔF_{Inst}	P	M	σ_b	ΔF_{Fluage}	$\Delta F/P_0$
Culée 1	17,90%	29966,21	0	7,64	55,17	2,21%
Déviateur1	13,81%	29977,67	7477,81	11,42	82,46	3,30%
Déviateur2	11,58%	29985,23	-2222,71	10,03	72,45	2,90%
Appui 1	15,09%	29985,26	-25008,25	7,99	57,74	2,31%
Appui 1	13,46%	29973,89	-25008,25	8,00	57,75	2,31%
Déviateur1	10,42%	29982,61	-1445,26	10,14	73,26	2,93%
Déviateur2	8,92%	29988,16	-865,37	10,23	73,87	2,96%
Appui 2	11,55%	29988,32	-26862,87	8,14	58,81	2,35%
Appui 2	13,46%	29973,86	-26862,87	8,14	58,80	2,35%
Déviateur1	10,40%	29982,66	-7378,12	9,29	67,13	2,69%
Déviateur2	8,90%	29988,23	-2026,62	10,06	72,67	2,91%
Appui 3	11,57%	29988,28	-30154,68	8,40	60,68	2,43%
Appui 3	12,87%	29974,89	-30154,68	8,40	60,67	2,43%
Déviateur1	9,96%	29983,26	-1692,08	10,11	73,01	2,92%
Déviateur2	8,58%	29988,45	2517,19	10,71	77,37	3,09%
Appui 4	11,05%	29988,77	-23415,38	7,87	56,85	2,27%
Appui 4	18,65%	29964,73	-23415,38	7,87	56,82	2,27%
Déviateur1	14,24%	29977,24	-7972,77	9,21	66,49	2,66%
Déviateur2	12,08%	29984,84	-1602,58	10,12	73,09	2,92%
Appui 5	15,60%	29985,08	-12806,78	7,04	50,81	2,03%
Appui 5	18,61%	29964,87	-12806,78	7,03	50,80	2,03%
Déviateur1	14,31%	29977,01	1368,01	10,54	76,14	3,05%
Déviateur2	12,13%	29984,69	1434,98	10,55	76,22	3,05%
Appui 6	15,58%	29985,14	-10722,97	6,87	49,63	1,99%
Appui 6	18,59%	29964,93	-10722,97	6,87	49,61	1,98%
Déviateur1	14,28%	29977,11	-3722,97	9,81	70,88	2,84%
Déviateur2	11,97%	29985,17	-17460,91	7,85	56,70	2,27%
Appui 7	15,71%	29984,77	-36379,26	8,89	64,20	2,57%
Appui 7	10,18%	29979,61	-36379,26	8,89	64,22	2,57%
Déviateur1	7,98%	29985,98	7170,09	11,38	82,18	3,29%
Déviateur2	6,85%	29990,3	6724,16	11,32	81,73	3,27%
Appui 8	8,94%	29990,19	-51939,53	10,12	73,06	2,92%
Appui 8	10,25%	29979,4	-51939,53	10,12	73,05	2,92%
Déviateur1	7,90%	29986,24	3857,14	10,90	78,76	3,15%
Déviateur2	6,84%	29990,32	2210,64	10,67	77,07	3,08%
Appui 9	8,92%	29990,25	-47793,16	9,79	70,71	2,83%
Appui 9	10,23%	29979,46	-47793,16	9,79	70,70	2,83%
Déviateur1	7,92%	29986,17	6698,66	11,31	81,70	3,27%

La suite du tableau présentant les pertes dues au fluage du béton, est donnée dans l'annexe B.5.

V.4.1.6. Pertes dues à la Relaxation des aciers

Les pertes de relaxation d'armature tendues sont données par la relation suivante :

$$\Delta\sigma_p(x) = \frac{6}{100} \times \rho_{1000} \times (\mu - \mu_0) \times \sigma_{pi}(x) \quad \text{Avec : } \mu = \frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}}$$

f_{prg} : Contrainte de rupture garantie 1860 N/mm².

$\sigma_{pi}(x)$: La contrainte instantanée à un point donné, en tenant compte de la perte de tension.

$$\sigma_{pi}(x) = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_{pi}(x)$$

$\mu_0 = 0.43$ Armature TBR (très basse relaxation)

$\rho_{1000} = 2,5 \%$ pour les aciers à très basse relaxation

Tableau V.19: Pertes dues à la relaxation des aciers

Section	X(m)	ΔF_{Inst}	σ_b	$\Delta F_{Relaxation}$	$\Delta F/P_0$
Culée 1	0,00	17,90%	1485,34	137,96	5,52%
Déviateur1	6,63	10,09%	1486,50	138,30	5,53%
Déviateur2	19,88	4,28%	1487,36	138,55	5,54%
Appui 1	26,50	4,27%	1487,36	138,55	5,54%
Appui 1	26,50	13,46%	1486,00	138,15	5,53%
Déviateur1	35,50	7,57%	1486,87	138,41	5,54%
Déviateur2	53,50	3,31%	1487,51	138,60	5,54%
Appui 2	62,50	3,25%	1487,52	138,60	5,54%
Appui 2	62,50	13,46%	1486,00	138,15	5,53%
Déviateur1	71,50	7,55%	1486,88	138,41	5,54%
Déviateur2	89,50	3,28%	1487,51	138,60	5,54%
Appui 3	98,50	3,27%	1487,51	138,60	5,54%
Appui 3	98,50	12,87%	1486,08	138,18	5,53%
Déviateur1	107,94	7,24%	1486,92	138,42	5,54%
Déviateur2	126,81	3,21%	1487,52	138,60	5,54%
Appui 4	136,25	3,10%	1487,54	138,60	5,54%
Appui 4	136,25	18,65%	1485,22	137,92	5,52%
Déviateur1	142,69	10,32%	1486,46	138,29	5,53%
Déviateur2	155,56	4,42%	1487,34	138,55	5,54%
Appui 5	162,00	4,33%	1487,36	138,55	5,54%
Appui 5	162,00	18,61%	1485,23	137,93	5,52%
Déviateur1	168,44	10,40%	1486,45	138,29	5,53%
Déviateur2	181,31	4,46%	1487,34	138,55	5,54%

La suite du tableau présentant les pertes dues à la relaxation des aciers, est donnée dans l'annexe B.6.

$$\Delta F_{Tot} = \Delta F_{Inst} + \Delta F_{dif}$$

Avec :

$$\Delta F_{dif} = \Delta F_{ret} + \Delta F_{fl} + \frac{5}{6} \Delta F_{rel} \quad [7]$$

Tableau V.20: Les pertes totales des câbles extérieurs

Section	ΔF_{Frot}	ΔF_{anc}	$\Delta F_{non-sim}$	ΔF_{ret}	ΔF_{flu}	$\frac{5}{6} \Delta F_{rel}$	ΔF_{Tot}
Culée 1	96,78	345,29	11,03	28,5	55,17	114,96	26,07%
Déviateur1	189,81	145,39	24,05	28,5	82,46	115,25	23,42%
Déviateur2	281,46	0,00	22,51	28,5	72,45	115,46	20,82%
Appui 1	369,47	0,00	16,63	28,5	57,74	115,46	23,51%
Appui 1	73,40	255,76	15,34	28,5	57,75	115,13	21,84%
Déviateur1	144,64	106,77	23,42	28,5	73,26	115,34	19,68%
Déviateur2	213,79	0,00	24,23	28,5	73,87	115,50	18,24%
Appui 2	280,91	0,00	17,00	28,5	58,81	115,50	20,03%
Appui 2	73,40	255,76	15,57	28,5	58,80	115,13	21,89%
Déviateur1	144,64	106,77	22,91	28,5	67,13	115,34	19,41%
Déviateur2	213,79	0,00	23,55	28,5	72,67	115,50	18,16%
Appui 3	280,91	0,00	17,43	28,5	60,68	115,50	20,12%
Appui 3	70,04	243,90	16,08	28,5	60,67	115,15	21,38%
Déviateur1	138,12	101,82	23,51	28,5	73,01	115,35	19,21%
Déviateur2	204,29	0,00	25,27	28,5	77,37	115,50	18,04%
Appui 4	268,61	0,00	16,59	28,5	56,85	115,50	19,44%
Appui 4	102,01	357,57	14,41	28,5	56,82	114,94	26,97%
Déviateur1	199,86	149,27	20,36	28,5	66,49	115,24	23,19%
Déviateur2	293,71	0,00	23,01	28,5	73,09	115,46	21,35%
Appui 5	383,73	0,00	15,05	28,5	50,81	115,46	23,74%
Appui 5	102,01	357,57	13,05	28,5	50,80	114,94	26,68%
Déviateur1	199,86	149,27	22,47	28,5	76,14	115,24	23,66%
Déviateur2	293,71	0,00	24,41	28,5	76,22	115,45	21,53%
Appui 6	383,73	0,00	14,49	28,5	49,63	115,46	23,67%
Appui 6	102,01	357,57	12,49	28,5	49,61	114,94	26,61%
Déviateur1	199,86	149,27	21,60	28,5	70,88	115,24	23,42%
Déviateur2	293,71	0,00	19,78	28,5	56,70	115,46	20,57%
Appui 7	383,73	0,00	18,07	28,5	64,20	115,46	24,40%
Appui 7	54,97	190,83	17,27	28,5	64,22	115,25	18,84%
Déviateur1	108,73	79,66	26,06	28,5	82,18	115,40	17,62%
Déviateur2	161,31	0,00	25,02	28,5	81,73	115,52	16,48%
Appui 8	212,73	0,00	20,32	28,5	73,06	115,52	18,01%

La suite du tableau présentant les pertes totales, est donnée dans l'annexe B.7.

V.4.2. Calcul des pertes pour la précontraintes de poussage

Les pertes de tension en cours de poussage seront évaluées de la même manière que les câbles de continuité.

Dans cette partie on se contentera de présenter les pertes de précontrainte de poussage juste pour le tronçon 3, vu l'importante longueur du tronçon 1.

Les pertes de poussage pour le tronçon 1 sont données dans l'annexe C.

V.4.2.1. Pertes dues au frottement

$$\Delta\sigma_f(x) = \sigma_{p0} \times (f \cdot \alpha(x) + \varphi \cdot x)$$

Avec : $f = 0,19 \text{ rad}^{-1}$ et $\varphi = 0,0016 \text{ m}^{-1}$

Tableau V.21: Pertes dues au frottement

Section	X(m)	$\alpha_i(x)$	f	φ	ΔF_{Fr}	$\Delta F_{Fro}/P_0$
Culée 2	0,00	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur 1	10,125	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	30,375	0,3015	0,19	0,0016	214,44	8,58%
Appui 1	40,50	0,3015	0,19	0,0016	177,11	7,08%
Déviateur 1	51,75	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	74,25	0,3015	0,19	0,0016	222,65	8,91%
Appui 2	85,50	0,3015	0,19	0,0016	181,29	7,25%
Déviateur 1	96,75	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	119,25	0,3015	0,19	0,0016	222,65	8,91%
Appui 3	130,50	0,3015	0,19	0,0016	181,29	7,25%
Déviateur 1	141,75	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	164,25	0,3015	0,19	0,0016	222,65	8,91%
Appui 4	175,50	0,3015	0,19	0,0016	181,29	7,25%
Déviateur 1	188,25	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	213,75	0,3015	0,19	0,0016	233,56	9,34%
Appui 5	226,50	0,3015	0,19	0,0016	186,85	7,47%
Déviateur 1	239,25	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	264,75	0,3015	0,19	0,0016	233,56	9,34%
Appui 6	277,50	0,3015	0,19	0,0016	186,85	7,47%
Déviateur 1	290,25	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	315,75	0,3015	0,19	0,0016	233,56	9,34%
Appui 7	328,50	0,3015	0,19	0,0016	186,85	7,47%
Déviateur 1	341,25	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	366,75	0,3015	0,19	0,0016	233,56	9,34%
Appui 8	379,50	0,3015	0,19	0,0016	186,85	7,47%

V.4.2.2. Pertes dues au recul d'ancrage

La perte par recul d'ancrage peut être calculée comme suit :

$$\Delta\sigma_g(x) = \sigma_0 - \sigma_2 = \sigma_0 \cdot 2 \cdot \psi \cdot \lambda$$

$$\text{Avec : } \quad \sigma_2 = \sigma_0(1 - 2\psi\lambda) \quad \lambda = \sqrt{\frac{g \cdot E_p}{\sigma_0 \cdot \psi}} \quad \psi = f \cdot \frac{\alpha}{L} + \varphi$$

g : L'intensité de recul d'ancrage égale à 6 mm

f : Coefficient de frottement en courbe (0.19 rd⁻¹) ;

φ : Coefficient de perte de tension par unité de longueur ($\varphi = 0.0016 \text{ m}^{-1}$).

α : Angle de déviation, déjà calculé dans le tracé du câblage pour la précontrainte de poussage.

$$\alpha = 0.3015 \text{ rad}$$

Tableau V.22: Les pertes dues au recul d'ancrage

Section	L (m)	α / L	f	φ	ψ	λ	ΔF_{anc}	$\Delta F_{\text{anc}} / P_0$
Culée 2	20,25	0,015	0,19	0,0016	0,004429	13,36	295,796	11,83%
Déviateur 1	20,250	0,015		0,0016	0,003387	15,28	258,661	10,35%
Déviateur2	20,250	0,015		0,0016	0,003387	15,28	0	0,00%
Appui 1	21,375	0,014		0,0016	0,003293	15,49	45,1527	1,81%
Déviateur 1	22,500	0,013	0,19	0,0016	0,004146	13,81	286,193	11,45%
Déviateur2	22,500	0,013		0,0016	0,003208	15,70	0	0,00%
Appui 2	22,500	0,013		0,0016	0,003208	15,70	47,2485	1,89%
Déviateur 1	22,500	0,013	0,19	0,0016	0,004146	13,81	286,193	11,45%
Déviateur2	22,500	0,013		0,0016	0,003208	15,70	0	0,00%
Appui 3	22,500	0,013		0,0016	0,003208	15,70	47,2485	1,89%
Déviateur 1	22,500	0,013	0,19	0,0016	0,004146	13,81	286,193	11,45%
Déviateur2	22,500	0,013		0,0016	0,003208	15,70	0	0,00%
Appui 4	24,000	0,013		0,0016	0,003108	15,95	49,6803	1,99%
Déviateur 1	25,500	0,012	0,19	0,0016	0,003846	14,33	275,661	11,03%
Déviateur2	25,500	0,012		0,0016	0,003019	16,18	0	0,00%
Appui 5	25,500	0,012		0,0016	0,003019	16,18	74,4119	2,98%
Déviateur 1	25,500	0,012	0,19	0,0016	0,003846	14,33	275,661	11,03%
Déviateur2	25,500	0,012		0,0016	0,003019	16,18	0	0,00%
Appui 6	25,500	0,012		0,0016	0,003019	16,18	74,4119	2,98%
Déviateur 1	25,500	0,012	0,19	0,0016	0,003846	14,33	275,661	11,03%
Déviateur2	25,500	0,012		0,0016	0,003019	16,18	0	0,00%
Appui 7	25,500	0,012		0,0016	0,003019	16,18	74,4119	2,98%
Déviateur 1	25,500	0,012	0,19	0,0016	0,003846	14,33	275,661	11,03%
Déviateur2	25,500	0,012		0,0016	0,003019	16,18	0	0,00%
Appui 8	12,750	0,024		0,0016	0,004438	13,35	71,4465	2,86%

V.4.2.3. Pertes dues au non simultanéité des mises en tension

Les pertes dues à la Non simultanéité des mises en tension se calculent comme suit :

$$\Delta\sigma_{Pi} = \frac{N-1}{2N} \times \frac{\sigma_b}{E_{bi}} \times E_p$$

Avec :

$\sigma_b(x)$: Contrainte du béton au centre de gravité des câbles, calculée comme suit :

$$\sigma_b(x) = \frac{P}{S} + \frac{P e^2}{I} - \frac{M e}{I}$$

$$P = P_0 N (1 - \Delta F_{Fro} - \Delta F_{anc})$$

E_{bi} : Module de déformation longitudinale du béton à l'âge t.

   t=14j

$$f_{c14} = \frac{t \cdot f_{c28}}{(4,76 + 0,83t)} = 34,19 \text{ Mpa} \quad E_{bi} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}} = 35701,98 \text{ Mpa}$$

E_p : Module d'élasticité d'acier, ($E_p = 19 \times 10^4$ MPa)

e : Excentricité des câbles.

$$e = \begin{cases} \text{Cable supérieur} \rightarrow e_s = 1,185 \text{ m} \\ \text{Cable inférieur} \rightarrow e_i = 1,795 \text{ m} \end{cases}$$

M : Moment dû au poids propre.

N : Nombre de câbles.

$$N = \begin{cases} \text{Hourdis supérieur (sur appui)} \rightarrow 20 \text{ Cables} \\ \text{Hourdis inférieur (sur travée)} \rightarrow 10 \text{ Cables} \end{cases}$$

Tableau V.23: Les pertes dues au non simultanéité des mises en tension

Section	ΔF_{fro}	ΔF_{an}	P	M	$\sigma_b(x)$	ΔF_{n-sim}	$\Delta F/p_0$
Cul��e 2	139,18	295,8	41297,31	0	11,49	29,05	1,16%
D��viateur1	139,18	258,7	21020,00	18905,25	13,01	31,15	1,25%
D��viateur2	214,44	0,0	22854,02	19706,51	13,99	33,51	1,34%
Appui 1	177,11	45,2	45551,48	-32964	16,55	41,84	1,67%
D��viateur1	139,18	286,2	20744,68	1477,26	9,78	23,41	0,94%
D��viateur2	222,65	0,0	22771,89	3344,03	11,04	26,44	1,06%
Appui 2	181,29	47,2	45426,02	-29230,46	16,08	40,64	1,63%
D��viateur1	139,18	286,2	20744,68	4379,32	10,29	24,65	0,99%
D��viateur2	222,65	0,0	22771,89	4583,13	11,26	26,97	1,08%
Appui 3	181,29	47,2	45426,02	-28822,85	16,03	40,52	1,62%
D��viateur1	139,18	286,2	20744,68	3344,03	10,11	24,21	0,97%
D��viateur2	222,65	0,0	22771,89	662,05	10,56	25,29	1,01%
Appui 4	181,29	49,7	45377,38	-34186,83	16,65	42,08	1,68%
D��viateur1	139,18	275,7	20850,00	7529,52	10,90	26,11	1,04%
D��viateur2	233,56	0,0	22662,85	4884,19	11,26	26,97	1,08%
Appui 5	186,85	74,4	44771,59	-39477,49	17,10	43,23	1,73%
D��viateur1	139,18	275,7	20850,00	4069,74	10,29	24,64	0,99%
D��viateur2	233,56	0,0	22662,85	5086,18	11,30	27,06	1,08%
Appui 6	186,85	74,4	44771,59	-37444,62	16,86	42,62	1,71%
D��viateur1	139,18	275,7	20850,00	4884,19	10,43	24,98	1,00%
D��viateur2	233,56	0,0	22662,85	3463,78	11,01	26,37	1,05%
Appui 7	186,85	74,4	44771,59	-40285,45	17,19	43,47	1,74%
D��viateur1	139,18	275,7	20850,00	5086,18	10,47	25,07	1,00%
D��viateur2	233,56	0,0	22662,85	9751,4	12,13	29,05	1,16%
Appui 8	186,85	71,4	44830,90	-30955,01	16,11	40,74	1,63%

La somme des pertes instantanées égale :

$$\Delta F_{Inst} = \Delta F_{frot} + \Delta F_{Anc} + \Delta F_{Non\ simul}$$

Tableau V.24: La somme des pertes instantanées

Section	ΔF_{Frot}	ΔF_{anc}	$\Delta F_{non-simu}$	$\Delta F_{instantanées}$
Culée 2	139,18	295,80	35,59	18,82%
Déviateur 1	139,18	258,66	24,03	16,88%
Déviateur2	214,44	0	24,45	9,56%
Appui 1	177,11	45,15	42,90	10,61%
Déviateur 1	139,18	286,19	20,96	17,85%
Déviateur2	222,65	0	24,29	9,88%
Appui 2	181,29	47,24	41,98	10,82%
Déviateur 1	139,18	286,19	21,64	17,88%
Déviateur2	222,65	0	23,95	9,86%
Appui 3	181,29	47,25	42,58	10,85%
Déviateur 1	139,18	286,19	21,55	17,88%
Déviateur2	222,65	0	25,40	9,92%
Appui 4	181,29	49,68	40,93	10,88%
Déviateur 1	139,18	275,66	19,94	17,39%
Déviateur2	233,56	0	23,53	10,28%
Appui 5	186,85	74,41	38,75	12,00%
Déviateur 1	139,18	275,66	21,59	17,46%
Déviateur2	233,56	0	23,97	10,30%
Appui 6	186,85	74,41	38,87	12,01%
Déviateur 1	139,18	275,66	21,07	17,44%
Déviateur2	233,56	0	22,75	10,25%
Appui 7	186,85	74,41	39,98	12,05%
Déviateur 1	139,18	275,66	27,96	17,71%
Déviateur2	233,56	0	30,09	10,55%
Appui 8	186,85	71,45	30,68	11,56%

V.4.2.4. Pertes dues au retrait du Béton

$$\Delta\sigma_r = \varepsilon_r \times E_a$$

Avec :

ε_r : Facteur dépend du climat, égale à 1.5×10^{-4} pour les régions humides.

$$E_a = 19 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$\Delta F_r = 28.5 \text{ kN}$$

$$\frac{\Delta F_r}{P_0} = 1.14 \%$$

V.4.2.5. Pertes dues au fluage du béton

Les pertes dues au fluage est de même grandeur que celle dues au retrait, elles se calculent comme suit :

$$\Delta\sigma_n = \frac{\sigma_b E_p K_{ft} f(t-t_i)}{E_{bj}}$$

Avec :

$$K_{ft} = K_s \cdot (K_e + K_c \cdot K(t_0))$$

$$K_c = \frac{120 - \rho_h}{30} + \frac{2(100 - \rho_h)}{3(20 + R_m)} = 1.702$$

$$K_s = \frac{1}{1 + 20\rho_s} = 0.91$$

$$K(14) = \frac{100}{100 + 14} = 0.877$$

$$f(\infty - 14) = 1 - \frac{\sqrt{14}}{\sqrt{14} + 5\sqrt{R_m}} = 1 - 0.086 = 0.913$$

$$K_{ft} = K_s \cdot (K_e + K_c \cdot K(t_0)) = 0.91 \cdot (0.4 + 1.702 \cdot 0.877) = 1.72$$

$$\Delta\sigma_n = \frac{1.57 \cdot \sigma_b E_p}{E_{bj}}$$

$$N = \begin{cases} \text{Sur appui} \rightarrow 20 \text{ Cables} \\ \text{Sur travée} \rightarrow 10 \text{ Cables} \end{cases}$$

Tableau V.25: Pertes dues au fluage du béton

Section	ΔF_{inst}	P	M	σ_b	ΔF_{fluage}	$\Delta F_{\text{flu}} / P_0$
Culée2	18,82%	49902,69	0	13,89	110,11	4,40%
Déviateur 1	16,88%	24956,21	22607,73	15,47	122,68	4,91%
Déviateur2	9,56%	24974,51	3452,25	12,07	95,69	3,83%
Appui 1	10,61%	49943,77	-46850,43	19,41	153,88	6,16%
Déviateur 1	17,85%	24953,77	-1800,34	11,12	88,20	3,53%
Déviateur2	9,88%	24973,71	1205,72	11,67	92,52	3,70%
Appui 2	10,82%	49942,70	-41518,83	18,78	148,90	5,96%
Déviateur 1	17,88%	24953,70	2507,14	11,89	94,28	3,77%
Déviateur2	9,86%	24973,74	2784,69	11,95	94,75	3,79%
Appui 3	10,85%	49942,58	-40972,13	18,71	148,39	5,94%
Déviateur 1	17,88%	24953,71	1236,8	11,66	92,49	3,70%
Déviateur2	9,92%	24973,59	4533,25	12,26	97,22	3,89%
Appui 4	10,88%	49942,42	-48574,37	19,61	155,48	6,22%
Déviateur 1	17,39%	24954,92	2092,54	11,82	93,70	3,75%
Déviateur2	10,28%	24972,69	6877,42	12,68	100,52	4,02%
Appui 5	12,00%	49936,80	-50026,64	19,78	156,82	6,27%
Déviateur 1	17,46%	24954,76	9764,69	13,18	104,54	4,18%
Déviateur2	10,30%	24972,65	7239,9	12,74	101,04	4,04%
Appui 6	12,01%	49936,77	-53225,96	20,15	159,80	6,39%
Déviateur 1	17,44%	24954,81	6946,63	12,68	100,56	4,02%
Déviateur2	10,25%	24972,77	4923,52	12,33	97,77	3,91%
Appui 7	12,05%	49936,55	-57312,43	20,63	163,61	6,54%
Déviateur 1	17,71%	24954,12	-2393,74	11,02	87,37	3,49%
Déviateur2	10,55%	24972,04	5612,43	12,45	98,74	3,95%
Appui 8	11,56%	49939,00	-44010,82	19,07	151,22	6,05%

V.4.2.6. Pertes dues à la relaxation des aciers

Les pertes de relaxation d'armature tendues sont données par la relation suivante :

$$\Delta\sigma_p(x) = \frac{6}{100} \times \rho_{1000} \times (\mu - \mu_0) \times \sigma_{pi}(x)$$

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

$$\sigma_{pi}(x) = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_{pi}(x)$$

$\mu_0 = 0.43$ Armature TBR (très basse relaxation)

$\rho_{1000} = 2,5 \%$ pour les aciers à très basse relaxation

Tableau V.26: Pertes dues à la relaxation des aciers

Section	X(m)	ΔF_{inst}	σ_b	ΔF_{rel}	$\Delta F_{rel} / P_0$
Culée 2	0,00	18,82%	1485,20	137,92	5,52%
Déviateur 1	10,125	16,88%	1485,49	138,00	5,52%
Déviateur2	30,375	9,56%	1486,58	138,32	5,53%
Appui 1	40,50	10,61%	1486,42	138,28	5,53%
Déviateur 1	51,75	17,85%	1485,34	137,96	5,52%
Déviateur2	74,25	9,88%	1486,53	138,31	5,53%
Appui 2	85,50	10,82%	1486,39	138,27	5,53%
Déviateur 1	96,75	17,88%	1485,34	137,96	5,52%
Déviateur2	119,25	9,86%	1486,53	138,31	5,53%
Appui 3	130,50	10,85%	1486,39	138,27	5,53%
Déviateur 1	141,75	17,88%	1485,34	137,96	5,52%
Déviateur2	164,25	9,92%	1486,52	138,31	5,53%
Appui 4	175,50	10,88%	1486,38	138,26	5,53%
Déviateur 1	188,25	17,39%	1485,41	137,98	5,52%
Déviateur2	213,75	10,28%	1486,47	138,29	5,53%
Appui 5	226,50	12,00%	1486,21	138,22	5,53%
Déviateur 1	239,25	17,46%	1485,40	137,98	5,52%
Déviateur2	264,75	10,30%	1486,47	138,29	5,53%
Appui 6	277,50	12,01%	1486,21	138,21	5,53%
Déviateur 1	290,25	17,44%	1485,41	137,98	5,52%
Déviateur2	315,75	10,25%	1486,47	138,29	5,53%
Appui 7	328,50	12,05%	1486,21	138,21	5,53%
Déviateur 1	341,25	17,71%	1485,36	137,96	5,52%
Déviateur2	366,75	10,55%	1486,43	138,28	5,53%
Appui 8	379,50	11,56%	1486,28	138,23	5,53%

$$\Delta F_{Tot} = \Delta F_{Inst} + \Delta F_{dif}$$

Avec :

$$\Delta F_{dif} = \Delta F_{ret} + \Delta F_{fl} + \frac{5}{6} \Delta F_{rel} \quad [7]$$

Tableau V.27: Pertes totales de poussage de Tronçon 3

Section	ΔF_{frot}	ΔF_{anc}	$\Delta F_{non-sim}$	ΔF_{ret}	ΔF_{flu}	$\frac{5}{6} \Delta F_{rel}$	$\Delta F_{Totales}$
Culée 2	139,18	295,80	38,25	28,5	114,93	135,43	30,09%
Déviateur 1	139,18	258,66	27,25	28,5	115,00	101,86	26,82%
Déviateur2	214,44	0	27,27	28,5	115,27	95,51	19,24%
Appui 1	177,11	45,15	44,02	28,5	115,23	143,99	22,16%
Déviateur 1	139,18	286,19	24,26	28,5	114,97	93,20	27,45%
Déviateur2	222,65	0	27,09	28,5	115,26	95,22	19,55%
Appui 2	181,29	47,25	43,08	28,5	115,22	141,41	22,27%
Déviateur 1	139,18	286,19	24,95	28,5	114,96	95,43	27,57%
Déviateur2	222,65	0	26,75	28,5	115,26	94,10	19,49%
Appui 3	181,29	47,25	43,69	28,5	115,22	143,26	22,37%
Déviateur 1	139,18	286,19	24,87	28,5	114,96	95,15	27,56%
Déviateur2	222,65	0	28,22	28,5	115,26	98,86	19,74%
Appui 4	181,29	49,68	42,08	28,5	115,22	138,45	22,21%
Déviateur 1	139,18	275,66	23,18	28,5	114,98	89,35	26,84%
Déviateur2	233,56	0	26,32	28,5	115,24	93,10	19,87%
Appui 5	186,85	74,41	40,06	28,5	115,18	133,56	23,14%
Déviateur 1	139,18	275,66	24,85	28,5	114,98	94,74	27,12%
Déviateur2	233,56	0	26,76	28,5	115,24	94,53	19,94%
Appui 6	186,85	74,41	40,18	28,5	115,18	133,93	23,16%
Déviateur 1	139,18	275,66	24,33	28,5	114,98	93,04	27,03%
Déviateur2	233,56	0	25,52	28,5	115,24	90,53	19,74%
Appui 7	186,85	74,41	41,29	28,5	115,18	137,33	23,34%
Déviateur 1	139,18	275,66	31,30	28,5	114,97	115,55	28,21%
Déviateur2	233,56	0	32,95	28,5	115,23	114,51	20,99%
Appui 8	186,85	71,45	31,54	28,5	115,20	107,39	21,64%

V.5. Vérification de l'effort tranchant

La partie résistante d'une poutre à l'effort tranchant est représentée par l'âme, les membrures supérieures et inférieures, (du fait de leur inertie par rapport au centre de gravité) sont les éléments résistants à la flexion. L'âme d'une poutre sera donc dimensionnée pour résister à l'effort tranchant.

Contrairement au béton armé, la contrainte au centre de gravité d'une section en béton précontraint n'est pas nulle ($\sigma_y = \frac{P}{B}$). Aussi sommes-nous obligés d'étudier la corrélation entre σ et τ dans tout l'élément de béton précontraint. [11]

On procède comme suit :

- En ELS : une vérification de la contrainte de cisaillement.
- En ELU : une vérification de la section des armatures transversales.
- Et une vérification de la compression des bielles.

V.5.1. Détermination de l'effort tranchant

Une section est sollicitée suivant l'effort tranchant par les forces suivantes :

- effort extérieurs de résultante $V = V_g + V_q$

V_g : Qui vient des charges permanentes.

V_q : Qui vient des charges variables.

- Effort de précontrainte $V_p = -P \sin(\alpha)$
- Dans le cas de poutres hyperstatiques. il y a lieu de prendre en compte l'effort tranchant du au moment hyperstatique de précontrainte pris égal à : $V = \frac{dM}{dx}$

La contrainte de cisaillement $\tau_{\text{réd}}$ due à l'effort tranchant réduit, peut se calculer par la formule suivante :

$$\tau_{\text{max}} = \frac{V_{\text{red}} S_0}{b_n I}$$

$$V_{\text{red}} = V_g + V_q - \sum P \cdot \sin(\alpha) = \frac{dM}{dx}$$

$$S_0 = B \cdot Y_G$$

$$b_n = b_0 - nk\Phi = b_0 - 0.5n\Phi : \text{Largeur nette de la section des âmes}$$

$n\Phi$: Diamètre de l'ensemble des gaines, $k=0.5$: cas des câbles injecté au coulis de ciment.

Les contraintes σ_x , σ_t et τ calculées sous l'effet des sollicitations en service, doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \tau^2 - \sigma_x \times \sigma_t \leq 0,4 \times f_{tj} \times \left[f_{tj} + \frac{2}{3}(\sigma_x + \sigma_t) \right] \\ \tau^2 - \sigma_x \times \sigma_t \leq 2 \times \frac{f_{tj}}{f_{cj}} \times [0,6 \times f_{cj} - \sigma_x - \sigma_t] \times \left[f_{tj} + \frac{2}{3}(\sigma_x + \sigma_t) \right] \end{cases}$$

$\sigma_x = \frac{P}{B}$: Contrainte normale longitudinale créée par la composante horizontale de précontrainte

$$\tau_{lim} = \min[\tau_1, \tau_2]$$

V.5.2. Calcul des contraintes de cisaillement limites

Les vérifications sont effectuées au voisinage des appuis où règne l'effort tranchant le plus important :

Les résultats des calculs sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau V.28: Contraintes de cisaillement limites

Section	Phase	P ₀ (kN)	Δp	P(kN)	σ_x	τ_1	τ_2	f _{cj}	f _{tj}	τ_{lim} (Mpa)
Culée	poussage	2499,8	0,17	2074.87	9.01	4.07	4.01	40	3	3.29
	continuité	2499,8	0,223	1942.38						
Appui	poussage	2499,8	0,13	2174.86	9.29	4.13	3.91	40	3	3.32
	continuité	2499,8	0,223	1943.13						

V.5.3. Calcul de contrainte de cisaillement a l'ELS

Les contraintes de cisaillement a l'ELS doivent vérifier la condition vis-à-vis la contrainte de cisaillement limite (c.à.d. $\tau \leq \tau_{lim}$).

$$\tau_{red} = \frac{V_{red}}{b_n Z}$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} Z = \frac{I}{S} \\ I: \text{Moment d'inertie de la section} \\ S: \text{Moment statique de la section} \end{array} \right\}$

Tableau V.29: Valeurs des contraintes de cisaillement à l'ELS

	Section	α_1	α_2	$\sum P_i \sin(\alpha_i)$	$V_g + V_q$	$V_{red}(kN)$	τ_{red}	Etat
En charge	Culée	0,32	0,00	6377.52	4378,97	-1998.55	-0.78	Vérifié
	Appui	0,18	0,18	9070.63	11510,58	2439.95	0.95	Vérifié
A vide	Culée	0,32	0,00	6377.52	3879,20	-2498.32	-0.98	Vérifié
	Appui	0,17	0,29	11065.81	6678,30	-4387.51	-1.71	Vérifié

V.5.4. Calcul de contrainte de cisaillement à l'ELU

Les contraintes de cisaillement calculées à l'ELU sont représentées dans le tableau suivant :

$$\tau_{red,u} = \frac{V_{red,u}}{b_n Z}$$

Tableau V.30: Valeurs des contraintes de cisaillement à l'ELU

	Section	α_1	α_2	p	$\sum P_i \sin(\alpha_i)$	$V_g + V_q$	$V_{red,u}(kN)$	$\tau_{red,u}$
En charge	Culée	0,22	0,00	1876,38	5788.81	8880,40	3091.59	1.21
	Appui	0,18	0,18	1867,13	9073.76	16033,70	6959.94	2.72

V.5.5. Détermination de l'inclinaison des bielles

En désignant par β_u l'angle des fissures avec la fibre moyenne de la poutre, on a :

$$\operatorname{tg} 2\beta_u = \frac{2\tau_u}{\sigma_{xu} - \sigma_{tu}}$$

σ_{xu} : Contrainte longitudinale due à la précontrainte

σ_{tu} : Contrainte transversale due à la précontrainte prise nulle

$$\operatorname{tg} 2\beta_u = \frac{2\tau_u}{\sigma_{xu}} = 15.17 \rightarrow \beta_u = 15^\circ$$

On a $\beta_u < 30^\circ \rightarrow \beta_u = 30^\circ$

V.5.6. Détermination des armatures transversales

Des armatures transversales sont nécessaires pour reprendre l'effort tranchant du tablier, elles sont calculées suivant les règles de BPEL qui donne une relation entre l'espacement et la quantité d'armature nécessaire.

$$\frac{A_t}{b_n S_t} \times \frac{f_e}{\gamma_s} \geq \left[\tau_{redu} - \frac{f_{tj}}{3} \right] \times \text{tg} \beta_u$$

A_t : Section des armatures transversales.

S_t : Espacement des armatures transversales.

f_e : Limite d'élasticité de l'acier.

Un minimum d'espacement est exigé soit : $S_t \leq \text{Min}[1m; 0.8h; 3b_0] = 1m$

$$\frac{A_t}{S_t} \geq \frac{1 \times 1.15}{500} \times \left[2.72 - \frac{3}{3} \right] \times \text{tg} 30 \times 10^2 \rightarrow \frac{A_t}{S_t} \geq 0.2284 \text{ cm}$$

Un pourcentage minimum doit être vérifié :

$$\frac{A_t}{S_t} \geq \frac{0.4 \times \gamma_s \times b_n}{f_e} \rightarrow \frac{A_t}{S_t} \geq 0.092 \text{ cm} \quad \checkmark \text{ Vérifié}$$

Soit : 1 cadre $\Phi 14\text{HA}$ pour chaque âme avec un espacement de $S_t = 20 \text{ cm}$

A noter que cette section ne correspond pas au ferrailage définitif. Une comparaison sera faite avec la section d'armature trouvée lors du ferrailage de la section transversale dans le chapitre qui suit. La plus grande des valeurs sera prise comme section définitive pour le ferrailage des âmes.

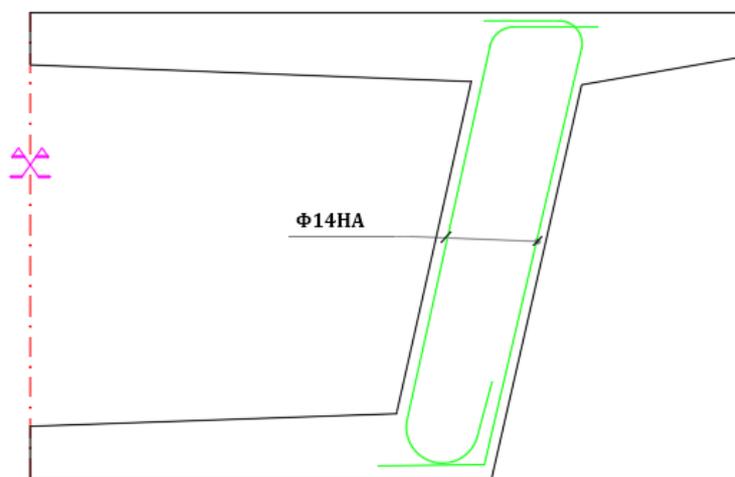


Figure V.8: Ferrailage de l'âme

V.5.7. Justification du béton

La contrainte de cisaillement τ_{redu} doit être au plus égale à : $\frac{0.85 f_{cj}}{3\gamma_b} \times \sin 2\beta_u$

$$\tau_{redu} \leq \frac{0.85 f_{cj}}{3\gamma_b} \times \sin 2\beta_u \rightarrow 2.72 \leq \frac{0.85 \times 40}{3 \times 1.5} \times \sin 60 \rightarrow 2.72 \leq 6.54 \quad \checkmark \text{ Vérifié}$$

V.5.8. Vérification à la torsion

Le tablier subit des efforts de torsion qu'il y a lieu de vérifier. Pour cela, on considère la contrainte de cisaillement verticale ajoutée à la contrainte de cisaillement par torsion.

La contrainte de cisaillement par torsion est donnée par la formule suivante [7].

$$\tau_{xy} = \tau_T = \frac{M_{xy}}{2 \Omega b_n} \rightarrow \tau_{xy} = \frac{0.18381}{2 \times 15.69 \times 1} = 0.01 \text{ MPa}$$

$M_{xy} = 183.81 \text{ kN.m}$: moment de torsion maximum.

$\Omega = 15.69 \text{ m}^2$: l'aire délimitée par la ligne moyenne.

V.5.9. Justification à L'ELS

Lorsqu'une poutre est soumise à la fois à un effort tranchant et à un couple de torsion, la contrainte de cisaillement de torsion τ_T se cumule avec la contrainte de cisaillement due à l'effort tranchant τ_V [7]. Il y a lieu de vérifier l'inégalité suivante :

$$\tau_{T_{ser}}^2 + \tau_{V_{ser}}^2 \leq \tau_{lim}^2 \rightarrow (-1.71)^2 + (0.01)^2 < (3.29)^2 \rightarrow 2.92 \leq 10.82 \quad \checkmark \text{ Vérifié}$$

V.5.10. Justification à L'ELU

Aux ELU une justification de la compression des bielles de béton est préconisée comme suit :

Sachant que $\tau_u = \tau_{V_u} + \tau_{T_u}$

On a :

$$\operatorname{tg} 2\beta_u = \frac{2(\tau_T + \tau_V)}{\sigma_{xy} - \sigma_{yu}} \rightarrow \beta_u = 15.22^\circ$$

La vérification qu'il y a lieu de faire est la suivante :

$$\tau_{T_u}^2 + \tau_{V_u}^2 \leq \left(\frac{f_{cj}}{4\gamma_b} \right)^2 \rightarrow 2.72^2 + 0.01^2 \leq \left(\frac{40}{4 \times 1.5} \right)^2 \rightarrow 7.39 \leq 44.4 \quad \checkmark \text{ Vérifié}$$

V.6. Conclusion

Ce chapitre représente une étape importante dans l'étude d'un pont. Pour bien mener une étude technico-économique du projet, on joue sur le type de la précontrainte, son emplacement et son tracé. La précontrainte doit assurer la stabilité du viaduc sous différentes sollicitations en cours de poussage et en service. Mais aussi, il est nécessaire de compléter la section transversale par des armatures passives, ceci est l'objet de chapitre suivant.

Chapitre VI

Ferraillage de la section transversale

VI.1. Introduction

Dans ce chapitre, notre objectif est la détermination des armatures passives transversales et longitudinale pour les âmes, l'hourdis inférieur et supérieur du caisson

Dans un ouvrage de hauteur constante comme c'est le cas de notre ouvrage, les calculs en flexion transversale sont menés dans la section courante, nous nous intéresserons donc à l'étude du voussoir courant. [12]

VI.2. Zones de justifications

Pour les ouvrages de hauteur constante présentant un épaissement du hourdis inférieur sur appui, cette variation est suffisamment localisée pour ne pas nécessiter, généralement, de calcul spécifique par rapport à la section courante. [12]

Dans une section du tablier, les principales sections à justifier sont en général les suivantes :

- Hourdis supérieur : à la racine de l'encorbellement, au droit du gousset côté intérieur, et au centre de la dalle ;
- Dans les âmes : au niveau du centre de gravité et aux extrémités supérieure et inférieure ;
- Hourdis inférieur : à la racine du gousset principalement.

VI.3. Calcul des Sollicitations

La modélisation est effectuée par le logiciel Robot **Structural Analysis**, le caisson est modélisé par une poutre caisson de largeurs (1m) appuyée au niveau de la partie inférieur des âmes sur deux appuis doubles à l'extrémité de chaque âme.

VI.3.1. Charges permanentes

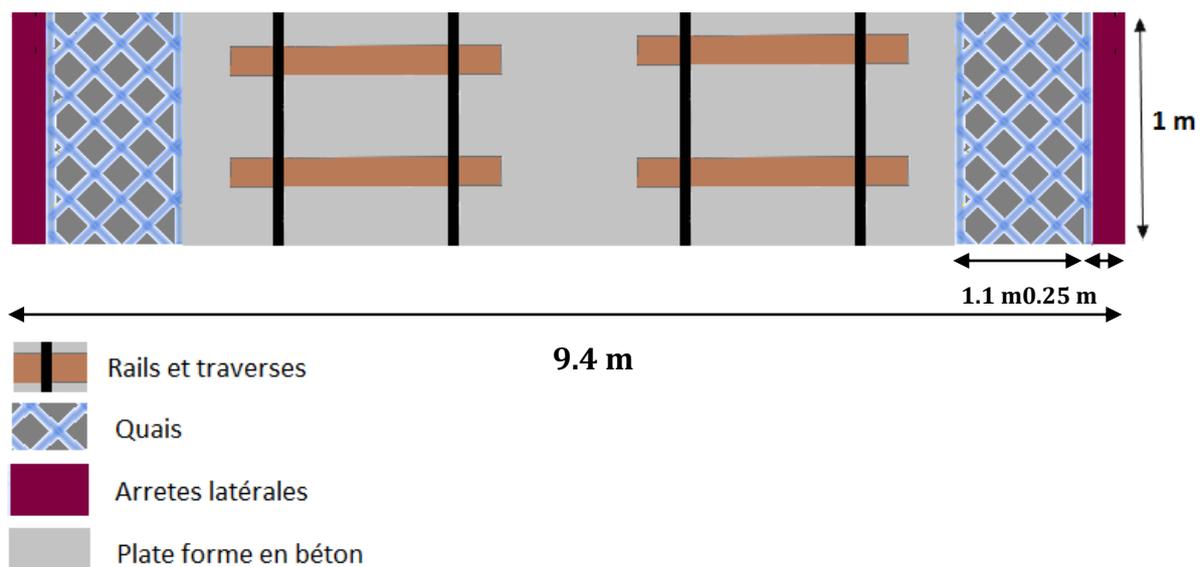


Figure VI.1: Vue de dessus du voussoir (une bande de largeur 1m)

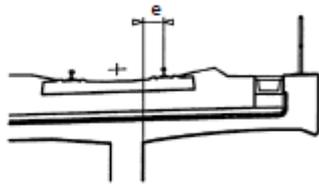
Tableau VI.1: Les surcharges appliquées sur la poutre caisson

Surcharges		Valeurs
Poids permanent	Rail et traverses de voie	15 kN/ml
	Quais	25kN/ml
	Plateforme en béton	30kN/ml
	Arête latérale	5kN/ml
Poids propre	Pris automatiquement par le logiciel Autodesk robot structural	-
charge d'exploitation	charges sur quais	10 kN/m ²
Charges roulante	UIC71*α*Φ_2	Voire (figure VI.2)

VI.3.2. Charges dues au trafic

La surcharge UIC71 appliquée sur la dalle de la poutre caisson est multipliée par le coefficient dynamique Φ_2 associé à l'étude transversale ; en tenant compte de la diffusion des charges longitudinalement et transversalement.

Tableau VI.2: Longueur déterminante pour l'étude transversale [3]

Cas n°	Elément de la structure	Longueur déterminante L_Φ
Tablier en béton avec lit de ballast : (pour les contraintes locales et transversales)		
4.1	Hourdis des poutres en caisson ou hourdis sur les poutres principales à âme pleine : - effet porteur transversal aux poutres principales - effet porteur dans le sens longitudinal - pièces de pont - porte-à-faux transversaux supportant la charge ferroviaire	3 fois la portée de la dalle de tablier 3 fois la portée de la dalle de tablier 2 fois la longueur de la pièce de pont  <p>Fig. 3 - Porte-à-faux transversal supportant les charges ferroviaires</p> - $e \leq 0,5 \text{ m}$: 3 fois l'espace d'appui de la plaque correspondante dans le sens transversal - $e > 0,5 \text{ m}$: ^a
4.2	Hourdis continu sur pièces de pont (dans le sens des poutres principales)	2 fois l'espace entre pièces de pont
4.3	Dalle pour ponts à poutres latérales et ponts à augets :	
	- effet porteur perpendiculaire aux poutres principales,	2 fois la portée de la dalle de tablier + 3 m
	- effet porteur dans le sens longitudinal	2 fois la portée de la dalle de tablier
4.4	Tablier à poutrelles enrobées avec effet porteur transversal entre les poutrelles d'acier longitudinales	2 fois la longueur déterminante dans le sens longitudinal
4.5	Porte-à-faux longitudinaux de la dalle de tablier	- $e \leq 0,5 \text{ m}$: 3,6 m ^b - $e > 0,5 \text{ m}$: ^a
4.6	Pièces de pont d'extrémités ou chevêtres/poutrelles transversales	3,6 m ^b

$L_\Phi = 3 \times 9.4 = 28.2 \text{ m} \rightarrow \Phi_2 = 1.1$

Le schéma de charge UIC71 devient comme suit :

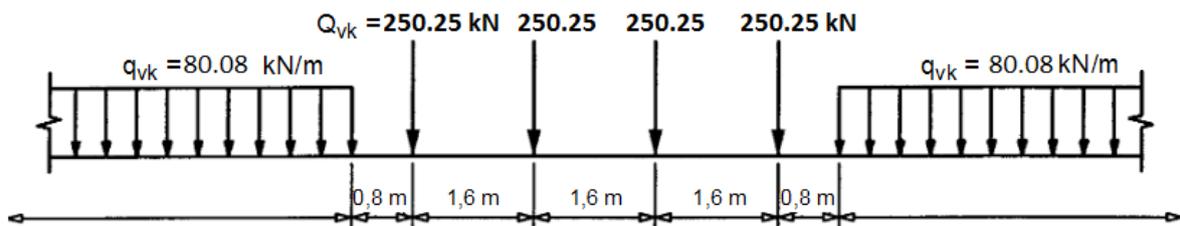


Figure VI.2: Modèle de charge UIC 71 corrigé

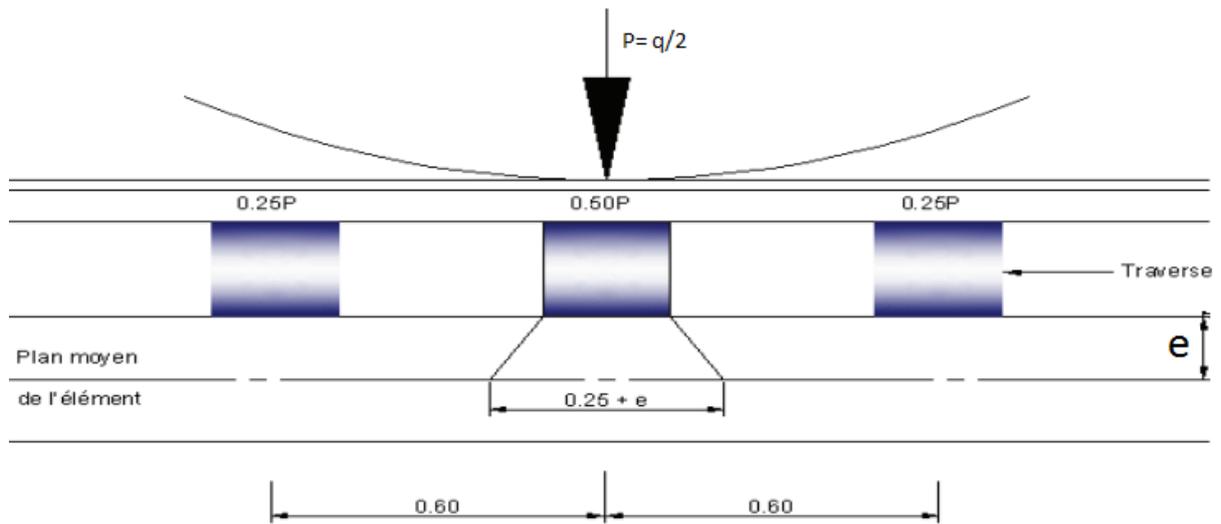


Figure VI.3: Répartition de la charge longitudinalement

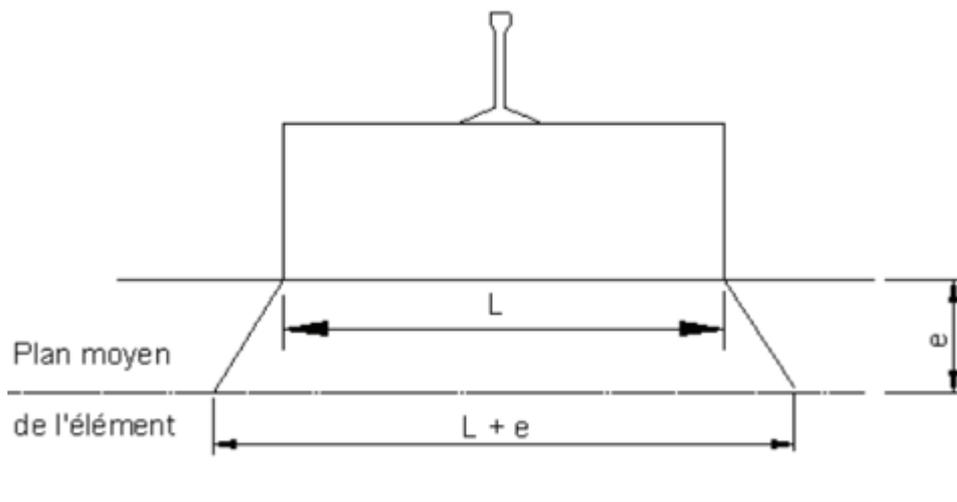


Figure VI.4: Répartition des charges transversalement

$L = 0.4$ m (pour les traverses ou les blochets)

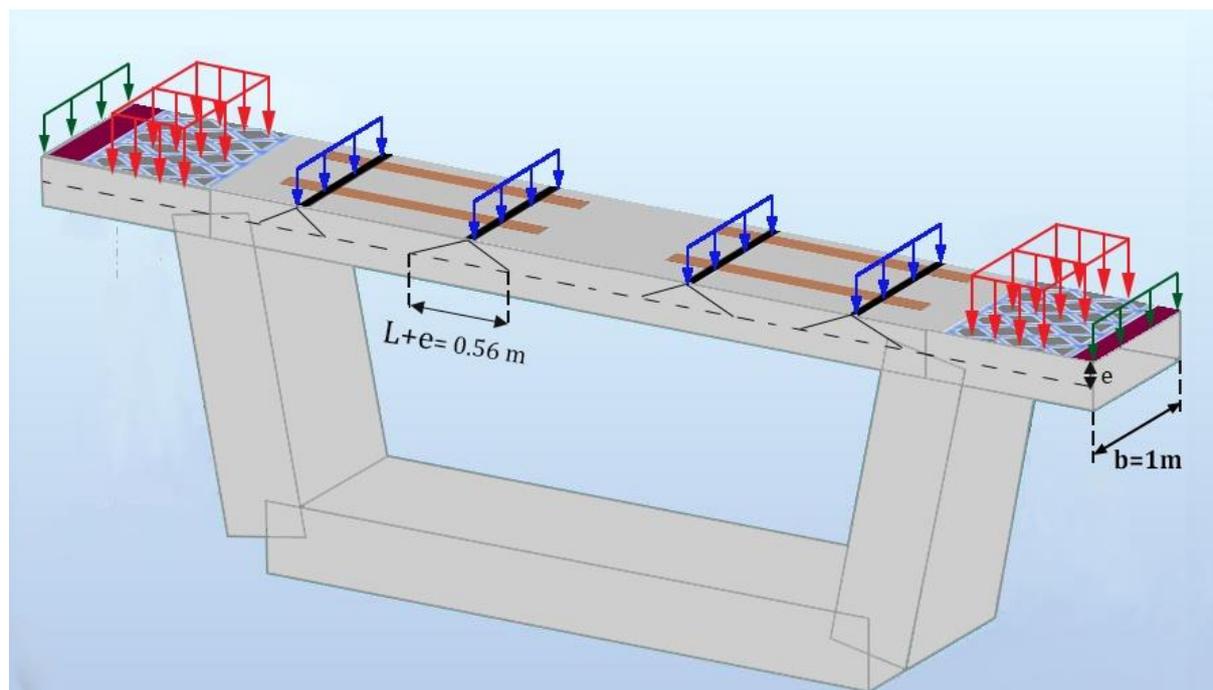


Figure VI.5: Les efforts agissants sur la poutre caisson

VI.4. Combinaison de charges

Le tableau ci-dessous montre les combinaisons de charges utilisées pour les calculs des sollicitations.

Tableau VI.3: Combinaison de charges utilisées pour le calcul de sollicitations

Cas de charge	Combinaisons	Majoration dynamique (Φ_2)
ELU fondamental	1,35 G + 1.45 UIC71+1.2 AQS	1.1
ELU statique	0.9 G + 1.45 UIC71+1.2 AQS	1,1
ELS fréquent	G + 0.6 UIC 71	1.1
ELS rare	G + UIC 71+0.8 AQS	1,1

Résultat obtenus

Les figures ci-dessous montrent le diagramme de moment fléchissant et l'effort tranchant sous les combinaisons citées précédemment.

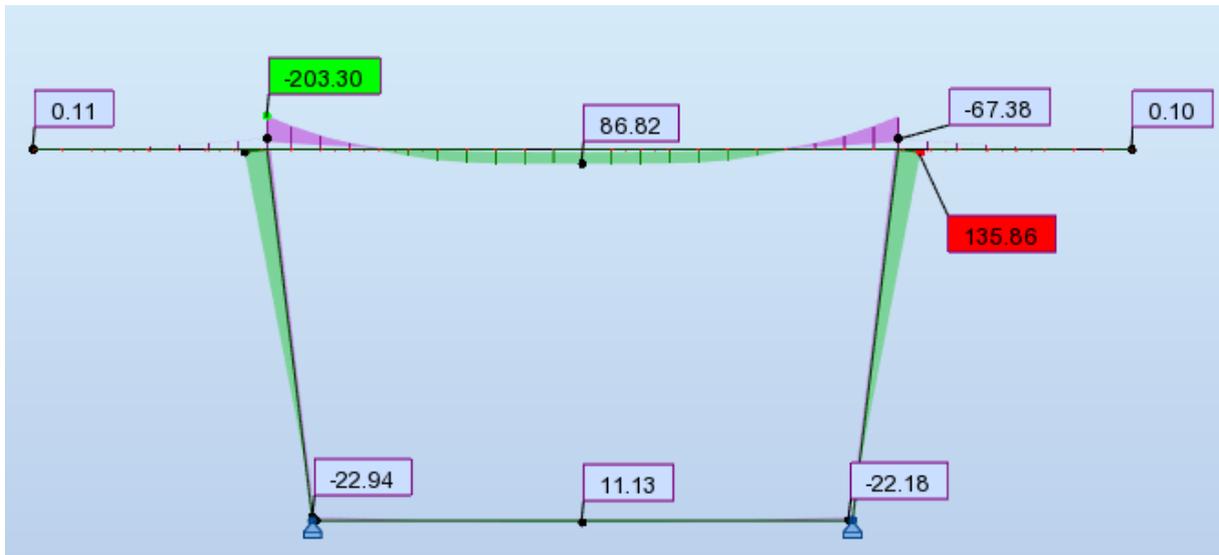


Figure VI.6: Moment fléchissant sous la combinaison E.L.U fondamentale

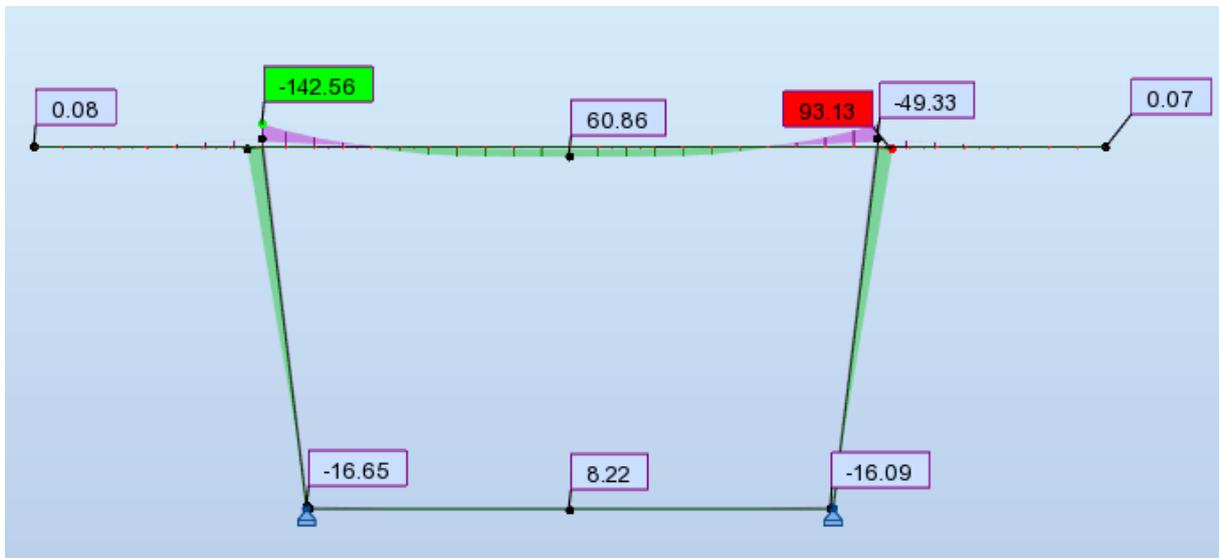


Figure VI.7: Moment fléchissant sous la combinaison E.L.S rare

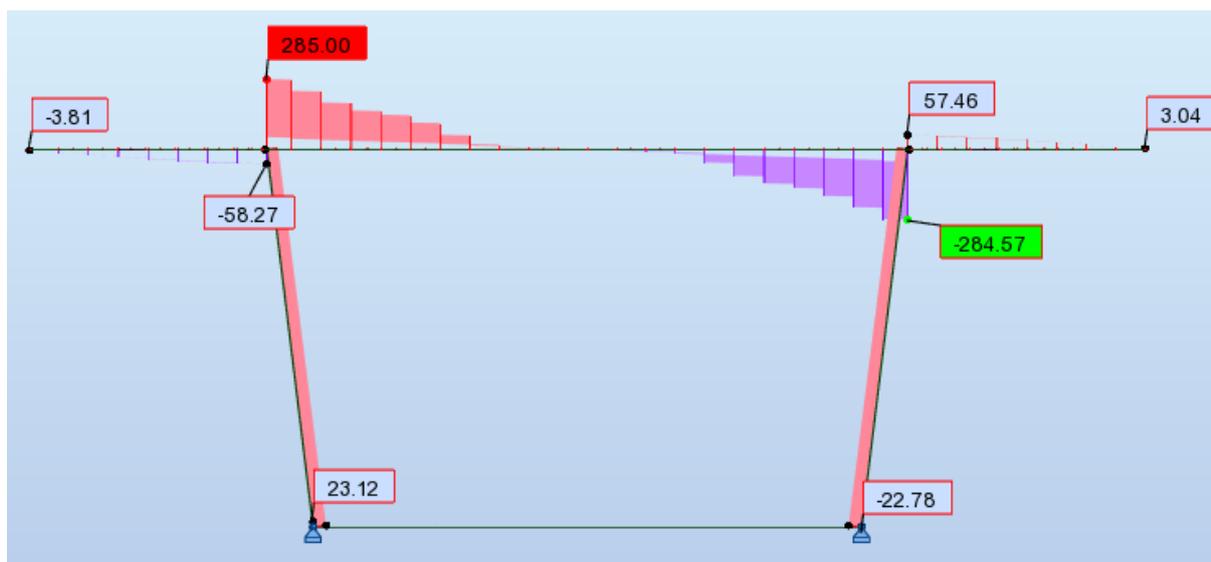


Figure VI.8: Effort tranchant sous la combinaison E.L.U fondamentale

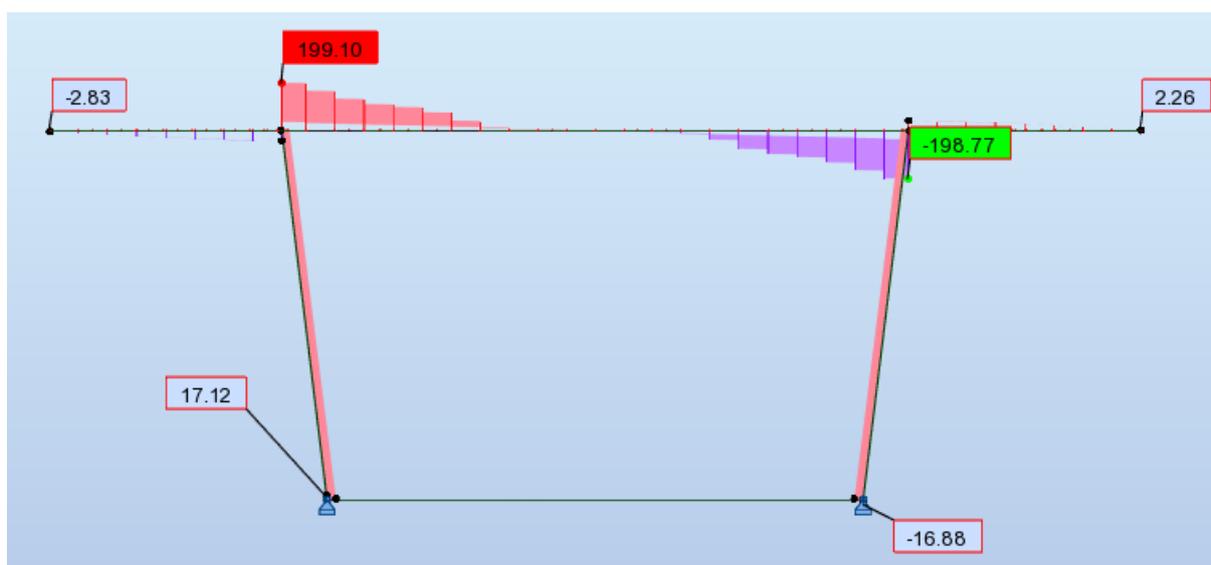


Figure VI.9: Effort tranchant sous la combinaison E.L.S rare

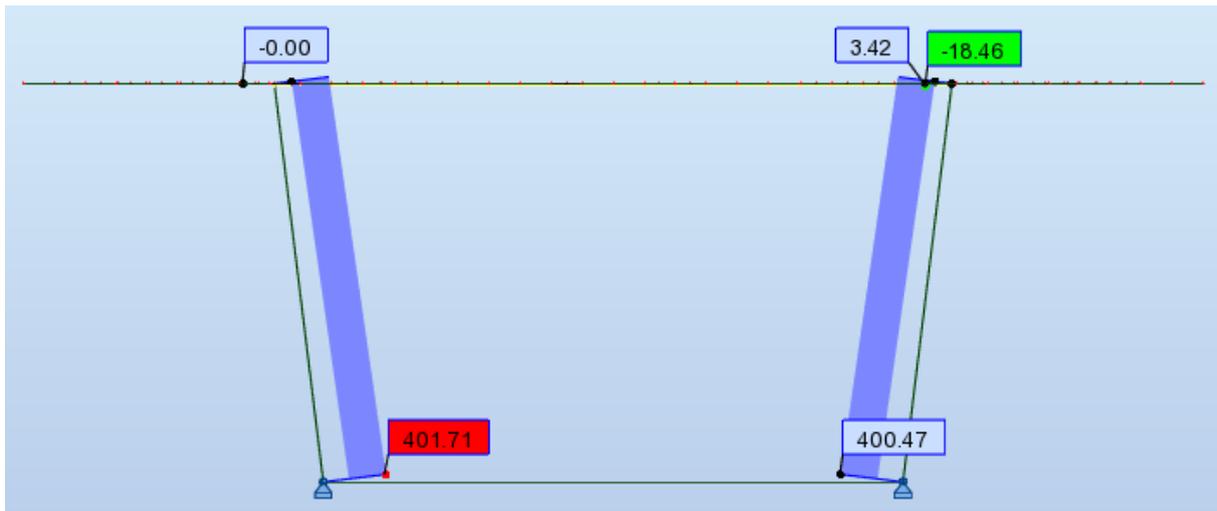


Figure VI.10: Effort normal sous la combinaison sous E.L.U fondamentale

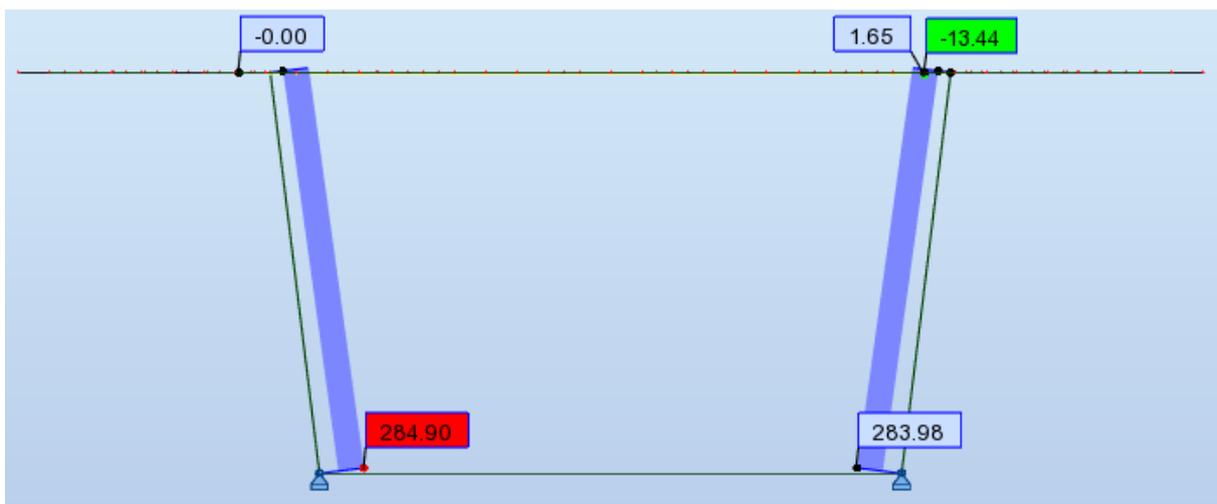


Figure VI.11: Effort normal sous la combinaison E.L.S rare

VI.5. Résultats de l'analyse

Les valeurs des efforts maximums sous les combinaisons les plus défavorables sont illustrées dans les tableaux suivants :

VI.5.1.1. Sollicitations en flexion simple

Les sollicitations en flexion simple des éléments de la poutre caisson sont données dans le tableau suivant :

Tableau VI.4: Sollicitations en flexion simple

Section	ELU		ELS	
	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)
Hourdis supérieur	86.82 ELU fondamental	-203.3 ELU fondamental	60.86 ELS rare	-142.56 ELS rare
Porte à faux	0 ∀ cas de charge	-67.38 ELU rare	0 ∀ cas de charge	-49.33 ELS rare
Hourdis inférieure	11.13 ELU fondamental	-22.94 ELU fondamental	8.22 ELS rare	-16.65 ELS rare

VI.5.2. Sollicitations en flexion composée

Le tableau suivant donne les efforts auxquelles les âmes de la poutre sont soumises :

Tableau VI.5: Sollicitations en flexion composée

Sections	ELU			ELS		
	N_{\max} (kN)	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)	N_{\max} (kN)	M_{\max} (kN.m)	M_{\min} (kN.m)
Âme	401.71 ELU fondamental	140 ELU statique	-22.94 ELU fondamental	284.9 ELS rare	93.13 ELS Rare	-16.64 ELS rare

VI.6. Ferrailage du voussoir

En l'absence de précontrainte transversale, la justification des pièces et la détermination du ferrailage s'effectuent selon les indications du BAEL 91 révisé 99 en considérant généralement la fissuration comme préjudiciable.

Pour les armatures longitudinales on prend généralement $\frac{A_s}{3}$ (disposition constructives)

Le ferrailage est calculé par le logiciel EXPERT (béton armé), les notes des calculs sont données dans l'annexe D.

La justification des pièces et la détermination du ferrailage s'effectuent en considérant généralement la fissuration comme très préjudiciable [12].

On subdivise le voussoir en plusieurs éléments :

- L'hourdis inférieur et l'hourdis supérieur travaillent en flexion simple ;
- Les deux porte-à-faux travaillent en flexion simple ;
- Les deux âmes travaillent en flexion composée.

L'enrobage $d'=4\text{cm}$

Dans le cas de la flexion simple on peut prendre comme bras de levier $0,9 d$ (d étant la hauteur utile de la poutre) : si on admet en outre que pour des poutres usuelles d est sensiblement égal à $0,9 h$ (h étant la hauteur totale de la poutre), on obtient pour une section rectangulaire simplement fléchie de largeur b armée d'une section A_s , la condition de non fragilité est donnée par la formule suivante : [13]

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

VI.6.1. Ferrailage des hourdis et de porte-à-faux

Les sections des aciers passifs sont données dans le tableau suivant.

Tableau VI.6: Section des aciers passifs pour les hourdis et le porte-à-faux

Section	ELU		ELS	
	A_{inf} (cm^2)	A_{sup} (cm^2)	A_{inf} (cm^2)	A_{sup} (cm^2)
Hourdis supérieur	7.91	19.37	15.13	35.44
Porte à faux	$A_{\min}=3.93$	$A_s=8.06$	$A_{\min}=3.93$	$A_s=15.94$
Hourdis inférieure	$A_{\min}=3.59$	$A_{\min}=3.59$	$A_{\min}=3.59$	$A_{\min}=3.59$

La distribution des armatures passives est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau VI.7: Récapitulatif sur les sections des aciers passifs des hourdis et de porte-à-faux

Sections	Nombre de barres	
	Nappe supérieure	Nappe inférieure
Hourdis supérieur	7HA32/ml	7HA20/ml
Porte à faux	7HA20/ml	7HA12/ml
Hourdis inférieur	7HA12/ml	7HA12/ml

VI.6.2. Ferrailage des âmes

Les sections des aciers passifs pour les âmes sont données dans le tableau suivant :

Tableau VI.8: Section des aciers passifs pour les âmes

Section	ELU		ELS	
	A_{inf} (cm ²)	A_{sup} (cm ²)	A_{inf} (cm ²)	A_{sup} (cm ²)
âme	$A_{min} = 6.35$	$A_{min} = 6.35$	$A_s = 12.44$	$A_{min} = 6.35$

Tableau VI.9: Récapitulatif sur les sections des aciers passifs des âmes

Sections	Nombre de barres	
	Nappe supérieure	Nappe inférieure
âme	7HA16/ml	7HA16/ml

VI.7. Conclusion

Les caissons monocellulaires représentent la majorité des sections d'ouvrages construits par poussage et par encorbellement successif. Leur ferrailage s'est avéré très complexe, et pour cela on était obligé de le diviser en plusieurs éléments (hourdis inférieur, âmes ...), chaque élément a été calculé suivant les sollicitations auxquelles il est soumis.

Chapitre VII

Etude de la pile

VII.1. Introduction

La pile est un appui intermédiaire supportant le tablier de l'ouvrage. Il s'agit d'un appui massif et permanent qui permet de transmettre les charges et surcharges aux fondations. Son choix est une étape très importante dans un projet qui dépend du type de projet à réaliser.

Plusieurs paramètres entre en jeux lors du choix des piles des ouvrages :

- Le mode de construction du tablier,
- Hauteur de la brèche à franchir,
- Type de fondations dépendant aussi de la nature de sol,
- Les contraintes fonctionnelles de projet.

VII.2. Etude de la pile

Vu la grande longueur de l'ouvrage, il est confronté à plusieurs contraintes (topographique, techniques, géotechnique....), par conséquent, on a différents types de piles :

- Pile pleine à section rectangulaire
- Pile pleine à section circulaire

Nous étudierons dans ce qui suit la pile 31 de hauteur $h = 19.25$ m, qui se situe au niveau du tronçon 3.

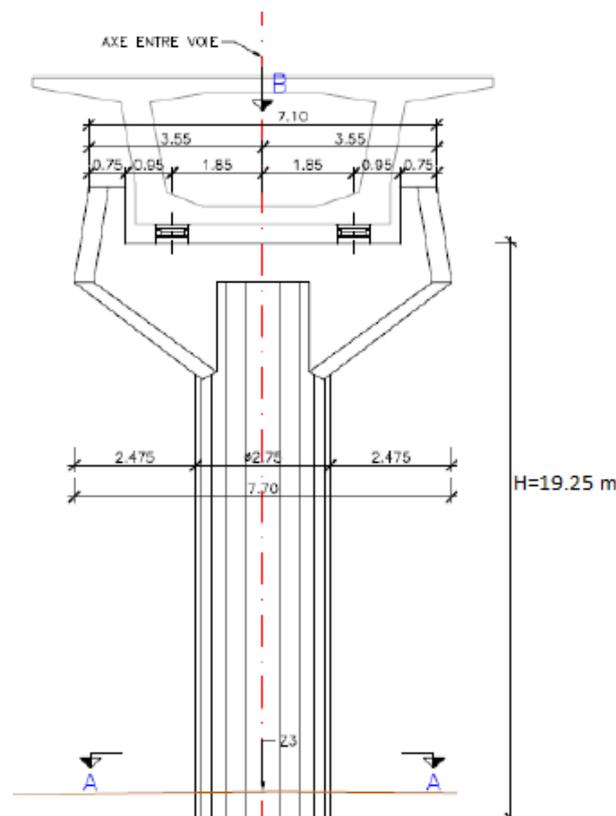


Figure VII.1: Section verticale de la pile

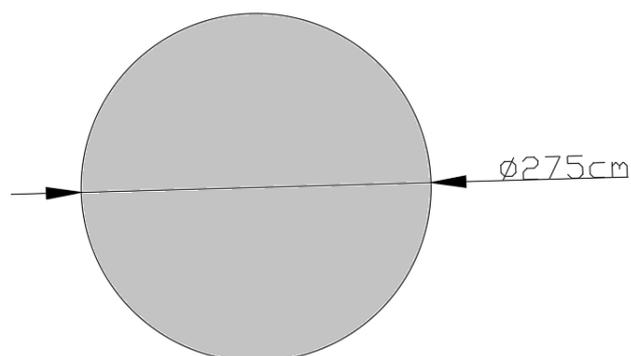


Figure VII.2: Section transversale de la pile

Caractéristiques de la section

- Aire = 5.939 m^2
- Périmètre = 8.63 m
- Moment d'inertie = 2.8 m^4

VII.2.1. Evaluation des Sollicitation

Les sollicitations ont été calculées à l'aide du logiciel **Robot Structural Analysis** sous les combinaisons les plus défavorables à L' ELU et L' ELS.

Tableau VII.1: Les combinaisons de charges

Cas de charge	Combinaisons
ELU fondamental	1,35 G + 1.45 UIC71+1.2 AQS
ELU statique	0.9 G + 1.45 UIC71+1.2 AQS
ELS fréquent	G + 0.6 UIC 71
ELS rare	G + UIC 71+0.8 AQS

Les efforts agissants sur la pile

- Effort normale **N** dû au poids propre du tablier et aux charges roulantes
- Effort de poussage
- Force de lacet
- Force centrifuge
- Freinage
- Vent

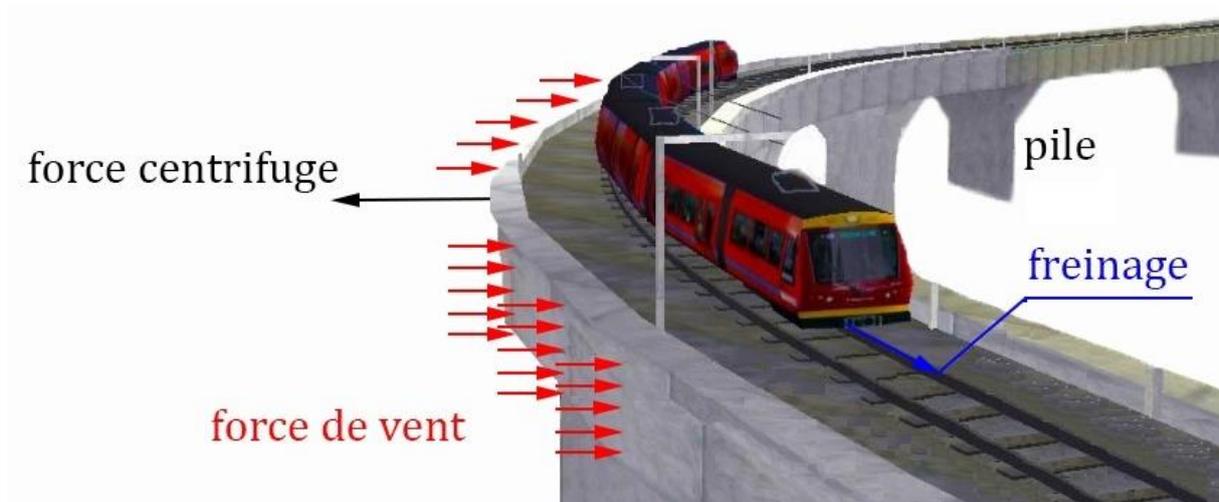


Figure VII.3: Efforts horizontaux agissants sur la pile

Les forces horizontales appliquées sur la pile créent des moments à la section d'encastrement qu'il y a lieu de prendre en compte lors de l'étude de la pile.

$$M_{vent} = F_{vent} \times H$$

$$M_{freinage} = F_{freinage} \times H$$

$$M_{centrifuge} = F_{centrifuge} \times H$$

$$M_{poussage} = F_{poussage} \times H$$

H : Hauteur de la pile.

VII.2.2. L'effort de poussage appliqué sur la pile

Le système **Eberspacher** du nom de son inventeur, est constitué :

- d'un vérin de levage disposé sur une plaque d'acier inoxydable et dont la sous-face est munie d'une plaque de **PTFE**. Le vérin de levage peut ainsi glisser sur la plaque d'acier inoxydable. Le vérin de levage est muni sur sa tête d'une plaque striée permettant d'obtenir, lors du contact avec le béton du tablier, un coefficient de frottement de l'ordre de 0,6 %. [6]
- d'un ou deux vérins horizontaux prenant appui sur un massif fixe et sur le vérin de levage. Ces vérins permettent ainsi le déplacement du vérin vertical d'une course d'environ 250 mm. Le massif, sur lequel le ou les vérins horizontaux s'appuient, sert également de massif de repos au tablier. [6]

On peut estimer l'effort de poussage des vérins en appliquant la loi de frottement $F = \sum f_i N_i$ qui se traduit par l'effort qu'il faut aux vérins d'appliquer sur le tablier pour vaincre les efforts de frottement qui naissent sur les appuis jusqu'à la dernière phase de poussage.

On peut tirer de cette loi l'effort de frottement subit par la pile à chaque phase de poussage, estimé à $F = fN$ avec $f = 0.04$.

Tableau VII.2: Réactions en chaque phase de poussage de tronçon 3

Phase	culée	Pile 34	Pile 33	Pile 32	Pile 31	Pile 30	Pile 29	Pile 28	Pile 27
phase 1	157,5	0,0	0	0	0	0	0	0	0
phase 2	309,0	225,3	0	0	0	0	0	0	0
phase 3	334,5	398,0	0	0	0	0	0	0	0
phase 4	330,5	474,9	0	0	0	0	0	0	0
phase 5	295,5	671,9	0	0	0	0	0	0	0
phase 6	260,5	909,2	145,9	0	0	0	0	0	0
phase 7	270,5	921,0	342,9	0	0	0	0	0	0
phase 8	271,0	916,3	428,0	0	0	0	0	0	0
phase 9	23,6	-37,5	148,5	0	0	0	0	0	0
phase 10	287,6	828,5	857,1	152,4	0	0	0	0	0
phase 11	284,4	845,6	863,0	361,4	0	0	0	0	0
phase 12	281,7	859,5	807,6	838,4	0	0	0	0	0
phase 13	284,2	846,4	858,1	436,5	0	0	0	0	0
phase 14	279,6	870,7	764,5	870,0	150,6	0	0	0	0
phase 15	280,4	866,3	781,3	877,1	349,0	0	0	0	0
phase 16	280,5	866,1	782,2	872,2	434,2	0	0	0	0
phase 17	282,0	858,3	812,5	758,9	793,5	0	0	0	0
phase 18	282,2	857,0	817,5	740,5	958,3	158,0	0	0	0
phase 19	281,8	858,9	810,0	768,3	958,7	383,5	0	0	0
phase 20	281,8	859,0	809,6	770,0	953,3	479,3	0	0	0
phase 21	281,4	861,3	801,0	802,2	848,2	829,2	0	0	0
phase 22	281,3	861,8	798,7	810,5	820,7	1006,4	151,9	0	0
phase 23	281,4	861,4	800,5	803,9	842,3	1014,9	374,9	0	0
phase 24	281,4	861,3	800,6	803,5	843,7	1009,8	470,6	0	0
phase 25	281,5	860,7	802,9	794,9	872,0	909,4	819,5	0,0	0,0
phase 26	281,5	860,6	803,4	792,9	878,5	886,5	991,9	154,0	0,0
phase 27	281,5	860,7	803,0	794,7	872,4	908,0	99,4	377,5	0,0
phase 28	281,5	860,7	802,9	794,9	872,0	909,4	994,3	473,2	0,0
phase 29	281,5	860,9	802,3	797,2	864,4	936,3	894,3	822,1	0,0
phase 30	281,5	860,9	802,2	797,7	862,7	942,7	870,6	995,6	153,4
phase 31	281,5	860,9	802,2	797,7	864,3	937,0	891,7	1003,4	376,8
phase 32	281,5	860,9	802,2	797,7	863,5	939,7	881,5	1041,8	361,8
phase 33	281,5	860,9	802,3	797,2	844,4	936,6	893,1	998,4	472,5

La sollicitation la plus défavorable est donnée par la combinaison ELU fondamentale

$$N = 31.0773 \text{ MN}$$

$$M = 42.9752 \text{ MN.m}$$

Le calcul donc se fera à la flexion composée

Vérification au flambement

$$l_f = 0.7 \times 19.25 = 13.475 \text{ m}$$

$$I = \frac{\pi D^4}{64} = 2.8 \text{ m}^4$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{2.8}{4.31}} = 0.8 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{l_f}{i} = \frac{13.475}{0.8} = 16.84 \leq 50 \quad \text{Vérifiée}$$

Avec :

l_f : Longueur de flambement

I_{\min} : Moment d'inertie de la section dans la direction de flambement

i : Rayon de giration

A : l'aire de la section

λ : L'élancement mécanique

VII.2.3. Ferrailage de la section

La section d'armature est déterminée selon les abaques de Walther pour des sections en béton armée sous la flexion composée.

$$h' = 0.055 \text{ m}$$

$$\frac{h'}{D} = 0.02$$

$$\frac{M_r}{\pi R^2 D \beta_w} = 0.07$$

$$\frac{N_r}{\pi R^2 \beta_w} = 0.1$$

D'après l'abaque N° 149

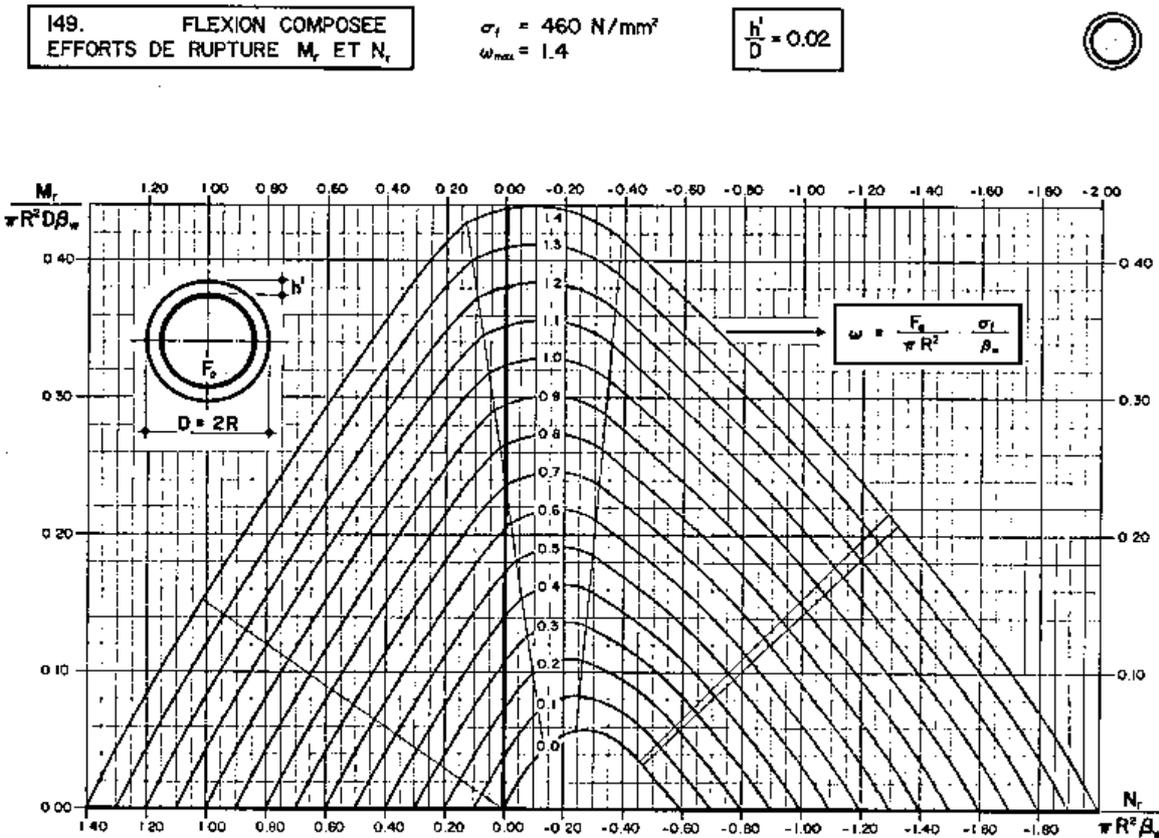


Figure VII.4: Abaque de Walther N°149 pour une section circulaire

$$w = 0.1 \rightarrow A_s = \frac{w\pi R^2 \beta_w}{\sigma_s} = 525.52 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 525.52 \text{ cm}^2 \rightarrow 42 \Phi 40$$

Armatures transversales

Pour la section transversale on prend la valeur normalisée la plus proche de $\frac{\Phi_t}{3}$ [14]

$$\Phi_t = \Phi 14$$

Espacement minimal $S_t = \min[12\Phi_t, b, 20\text{cm}]$ en zone courante [17]

Soit $S_t = 15 \text{ cm}$

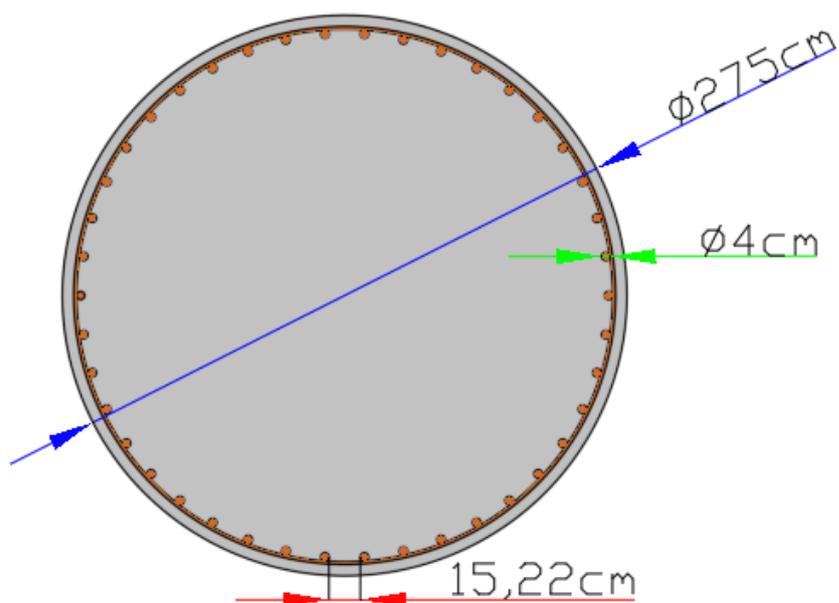


Figure VII.5: Ferrailage de la pile

VII.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu établir le ferrailage de la pile pour qu'elle puisse résister aussi bien en construction qu'en service. La particularité de cette étude est liée au type de l'ouvrage. Etant un pont poussé l'étude des piles se distingue des autres ponts à cause des efforts qu'elles subissent en phase de construction dus au mode de construction de tablier.

Conclusion Générale

Ce projet de fin d'étude représente une phase importante dans notre formation d'élève Ingénieur à l'Ecole Nationale Polytechnique. Cela nous a permis de mettre en application nos acquis, approfondir et compléter nos connaissances théoriques.

A travers ce travail, nous avons pu traiter les différents aspects techniques caractérisant les ponts poussés, tout en apprenant l'application de la réglementation et les normes en vigueur propres aux ponts rails.

La particularité de ce type d'ouvrage réside dans la nécessité d'utiliser deux types de précontraintes. Une précontrainte intérieure au béton est généralement plus simple à implémenter, utilisée lors de poussage du tablier. Complétée par une précontrainte extérieure permettant d'optimiser la forme de la section transversale, de contrôler ultérieurement l'état et la tension dans les câbles, et éventuellement de les remplacer.

Vu la complexité du projet, familiariser avec les logiciels de modélisations (AutoCAD, Robot) nous a été d'une nécessité absolue.

L'étude d'un pont rail poussé est loin d'être une tâche simple, nous avons été confrontés à de nombreux obstacles. La principale difficulté est le chargement particulier du métro. De ce fait nous avons dû faire preuve d'initiative pour remédier au manque de références bibliographiques en la matière.

Enfin, ce travail n'a fait qu'augmenter notre passion envers le domaine de Génie Civil notamment pour les Ouvrages d'Arts. Et il nous a permis d'avoir un aperçu du monde professionnel auquel nous sommes confrontés.

Références Bibliographiques

- [1] Anne BERNARD-GELY et Jean-Armand CALGARO. *Conception des ponts – Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris. 1994.360p.ISBN 2-85978-215-X.*
- [2] CALGARO, Jean-Armand, VIRLOGEUX, Michel. *Projet et construction des ponts. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 1987.251p.ISBN 2-85978-095-5.*
- [3] LIVRET 2.01, SNCF (1995).*Règles de conception et de calcul des ouvrages en béton, en métal ou mixtes. Paris.306 p*
- [4] Eurocode 1 : *Bases de calcul et actions sur les structures. Partie 3 : Charges sur les ponts dues au trafic. AFNOR. Paris. 1997. 147 p.*
- [5] Eurocode 1 : *Bases de calcul et actions sur les structures -Partie 2-5 : Actions sur les structures - Actions thermiques. AFNOR. Paris. 1997. 62 p.*
- [6] Association française de génie civil. *Guide des ponts poussés-Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.Paris.1999. 240p. ISBN 2 -85978-313-X.*
- [7] Fascicule n° 62- Titre I – Section II, Avril 1999. *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites – BPEL 91 révisé 99.*
- [8] SETRA. (Février 1990). *Précontrainte extérieure. 46, avenue Aristide Briand - B.P. 100 - 92223 Bagneux Cedex - FRANCE.*
- [9] NECHAK, Ali. KIRAM, Farid. *Etude d'un pont poussé au plateau des Annasers.159P. Thèse de projet de fin d'études : Génie civil : Alger, Ecole Nationale Polytechnique : 2007*
- [10] Patrick le Delliou. *Béton précontraint aux eurocodes. Presses universitaires de Lyon. ENTPE.Lyon.2003. ISBN 2-7297-0724-7.*
- [11] Dr.BOUTEMEUR .*Cours de béton précontraint de l'Ecole Nationale Polytechnique.*
- [12] SETRA (Service d'Etude Techniques des Routes et Autoroutes), Juin 2003. *Ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs - Guide de conception.*
- [13] Fascicule n° 62- Titre I – Section I, Avril 1999. *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites – BAEL 91 révisé 99.*
- [14] Dr.BOUTEMEUR. *Cours de béton armé de l'Ecole Nationale Polytechnique.*
- [15] WALTHER.R, HOURIET.B. *Abaques pour le dimensionnement des sections en béton armé – Presse polytechniques romandes de Lausanne, 1977.331p.*
- [16] SETRA. *Appuis des tabliers P.P.73 (1.3.1). 46P, Avenue Aristide Briand BP 100-92 223-BAGNEUX.*
- [17] Ministère des Travaux Publics. *Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art(2008).Alger*

Annexes

Annexe A

Annexe A.1. Sollicitations maximales dues au poids propre de Tronçon1

Phase	M _{max} Travée (T.m)	M _{max} Appui (T.m)	Réaction max (T)
Phase 1	0	-460,26	309,0
Phase 2	9041,51	-7150,53	1910,46
Phase 3	13513,37	-4097,84	2982,36
Phase 4	9480	-13500,22	3598,34
Phase 5	8278,95	-21488,71	6391,57
Phase 6	16115	-21741,53	6815,24
Phase 7	12336,77	-19153,19	6369
Phase 8	9051,53	-22781,13	6630
Phase 9	11481,92	-20970,72	6672,81
Phase 10	10846,02	-20544,31	6601,41
Phase 11	10690,13	-24763,11	6818,49
Phase 12	18353,12	-24869,57	7277
Phase 13	13815,88	-22042,11	6829
Phase 14	12301,69	-20989,41	6662,33
Phase 15	12001,27	-20770,2	6627,63
Phase 16	13016,58	-21494,4	6742,34
Phase 17	12369,68	-21038,21	6670,07
Phase 18	12725,59	-21289,21	6709,83
Phase 19	12461,14	-21102,74	6680,29
Phase 20	12590,74	-21194,13	6694,28
Phase 21	12558,35	-21171,28	6691,15
Phase 22	12694,61	-35932,37	6706,64
Phase 23	16228,68	-42812,18	8447,63
Phase 24	28349,41	-33512,12	8094,57
Phase 25	20613,81	-35932,37	7380,56
Phase 26	17361,68	-47946,64	9473,64
Phase 27	24582,32	-42056,74	9488,4
Phase 28	20603,66	-35932,37	8725,84
Phase 29	21337,16	-45414,81	9123,58
Phase 30	25803,94	-39238,43	9137,93
Phase 31	20387,53	-36666,23	8818,07
Phase 32	19997,97	-45967,84	9204,66
Phase 33	25486,88	-39958,98	9227,53
Phase 34	20429,57	-36520,64	8799,97
Phase 35	20352,01	-45815,48	9182,32
Phase 36	25572,96	-39763,34	9203,21
Phase 37	20417,19	-36563,49	8805,3
Phase 38	20256,79	-45856,01	9188,26

Phase 39	25549,98	-39815,58	9209,7
Phase 40	20420,43	-36552,28	8809,9
Phase 41	20282,28	-45845,13	9186,67
Phase 42	25556,14	-39801,57	9207,96
Phase 43	20419,56	-36555,31	8804,28
Phase 44	20275,45	-45848,04	9187,01
Phase 45	25554,49	-39805,33	9208,43
Phase 46	20419,79	-36554,5	8804,18
Phase 47	20309,81	-46117,11	9204,27
Phase 48	25554,93	-39804,32	9208,3
Phase 49	20419,73	-36554,72	8804,21
Phase 50	20276,79	-46117,32	9204,3
Phase 51	25554,81	-39804,59	9208,34
Phase 52	20276,92	-44608,89	8804,19
Phase 53	20276,93	-50788,86	9586,96
Phase 54	29971,21	-43257,41	9580,09
Phase 55	20276,9	-44608,89	8802,2
Phase 56	20276,89	-52310,46	9811,43
Phase 57	32464,96	-47355,89	10072,54
Phase 58	29052,11	-45392,86	9841,59
Phase 59	23950,11	-42233,02	9469,88
Phase 60	21969,89	-40919,73	9315,11
Phase 61	22872,24	-41522,45	9386,25
Phase 62	22596,92	-41339,43	9364,72
Phase 63	22752,47	-41442,83	9376,88
Phase 64	22528,41	-41293,89	9359,36
Phase 65	22518,55	-41287,33	9358,59
Phase 66	22452,09	-41243,11	9353,39
Phase 67	22513,2	-41283,78	9358,17
Phase 68	22528,81	-41294,15	9359,39
Phase 69	22509,69	-41281,45	9357,9

Annexe B

Calcul des pertes pour la précontrainte de continuité

Annexe B.1. Pertes dues au frottement

Section	X(m)	$\alpha_i(x)$	$\sum_{i=1} \alpha_i(x)$	f	ΔF_{fro}	$\Delta F_{\text{fro}}/P_0$
Culée 1	0,00	0,329	0,329	0,12	96,78	3,87%
Déviateur1	6,63	0,329	0,658	0,12	189,81	7,59%
Déviateur2	19,88	0,337	0,995	0,12	281,46	11,26%
Appui 1	26,50	0,337	1,333	0,12	369,47	14,78%
Appui 1	26,50	0,248	0,248	0,12	73,40	2,94%
Déviateur1	35,50	0,248	0,497	0,12	144,64	5,79%
Déviateur2	53,50	0,248	0,745	0,12	213,79	8,55%
Appui 2	62,50	0,248	0,993	0,12	280,91	11,24%
Appui 2	62,50	0,248	0,248	0,12	73,40	2,94%
Déviateur1	71,50	0,248	0,497	0,12	144,64	5,79%
Déviateur2	89,50	0,248	0,745	0,12	213,79	8,55%
Appui 3	98,50	0,248	0,993	0,12	280,91	11,24%
Appui 3	98,50	0,237	0,237	0,12	70,04	2,80%
Déviateur1	107,94	0,237	0,474	0,12	138,12	5,53%
Déviateur2	126,81	0,237	0,710	0,12	204,29	8,17%
Appui 4	136,25	0,237	0,947	0,12	268,61	10,75%
Appui 4	136,25	0,347	0,347	0,12	102,01	4,08%
Déviateur1	142,69	0,347	0,694	0,12	199,86	7,99%
Déviateur2	155,56	0,347	1,042	0,12	293,71	11,75%
Appui 5	162,00	0,347	1,389	0,12	383,73	15,35%
Appui 5	162,00	0,347	0,347	0,12	102,01	4,08%
Déviateur1	168,44	0,347	0,694	0,12	199,86	7,99%
Déviateur2	181,31	0,347	1,042	0,12	293,71	11,75%
Appui 6	187,75	0,347	1,389	0,12	383,73	15,35%
Appui 6	187,75	0,347	0,347	0,12	102,01	4,08%
Déviateur1	194,19	0,347	0,694	0,12	199,86	7,99%
Déviateur2	207,06	0,347	1,042	0,12	293,71	11,75%
Appui 7	213,50	0,347	1,389	0,12	383,73	15,35%
Appui 7	213,50	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	225,56	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	249,69	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 8	261,75	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 8	261,75	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	273,81	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	297,94	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 9	310,00	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%

Appui 9	310,00	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	322,06	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	346,19	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 10	358,25	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 10	358,25	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	370,31	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	394,44	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 11	406,50	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 11	406,50	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	418,56	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	442,69	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 12	454,75	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 12	454,75	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	466,81	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	490,94	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 13	503,00	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 13	503,00	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	515,06	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	539,19	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 14	551,25	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 14	551,25	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	563,31	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	587,44	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 15	599,50	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 15	599,50	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	611,56	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	635,69	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 16	647,75	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 16	647,75	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	659,81	0,185	0,371	0,12	108,73	4,35%
Déviateur2	683,94	0,185	0,556	0,12	161,31	6,45%
Appui 17	696,00	0,185	0,741	0,12	212,73	8,51%
Appui 17	696,00	0,185	0,185	0,12	54,97	2,20%
Déviateur1	708,75	0,175	0,361	0,12	105,86	4,23%
Déviateur2	734,25	0,175	0,536	0,12	155,69	6,23%
Appui 18	747,00	0,175	0,711	0,12	204,49	8,18%
Appui 18	747,00	0,175	0,175	0,12	52,04	2,08%
Déviateur1	759,75	0,175	0,351	0,12	102,99	4,12%
Déviateur2	785,25	0,175	0,526	0,12	152,88	6,12%
Appui 19	798,00	0,175	0,701	0,12	201,73	8,07%
Appui 19	798,00	0,298	0,298	0,12	87,81	3,51%
Déviateur1	805,50	0,298	0,596	0,12	172,54	6,90%
Déviateur2	820,50	0,298	0,894	0,12	254,30	10,17%

Appui 20	828,00	0,298	1,192	0,12	333,18	13,33%
Appui 20	828,00	0,298	0,298	0,12	87,81	3,51%
Déviateur1	835,50	0,298	0,596	0,12	172,54	6,90%
Déviateur2	850,50	0,298	0,894	0,12	254,30	10,17%
Appui 21	858,00	0,298	1,192	0,12	333,18	13,33%
Appui 21	858,00	0,298	0,298	0,12	87,81	3,51%
Déviateur1	865,50	0,298	0,596	0,12	172,54	6,90%
Déviateur2	880,50	0,298	0,894	0,12	254,30	10,17%
Appui 22	888,00	0,298	1,192	0,12	333,18	13,33%
Appui 22	888,00	0,298	0,298	0,12	87,81	3,51%
Déviateur1	895,50	0,298	0,596	0,12	172,54	6,90%
Déviateur2	910,50	0,298	0,894	0,12	254,30	10,17%
Appui 23	918,00	0,298	1,192	0,12	333,18	13,33%
Appui 23	918,00	0,175	0,175	0,12	52,04	2,08%
Déviateur1	930,75	0,175	0,351	0,12	102,99	4,12%
Déviateur2	956,25	0,175	0,526	0,12	152,88	6,12%
Appui 24	969,00	0,175	0,701	0,12	201,73	8,07%
Appui 24	969,00	0,232	0,232	0,12	68,70	2,75%
Déviateur1	978,63	0,232	0,464	0,12	135,50	5,42%
Déviateur2	997,88	0,232	0,697	0,12	200,48	8,02%
Appui 25	1007,50	0,232	0,929	0,12	263,66	10,55%
Appui 25	1007,50	0,232	0,232	0,12	68,70	2,75%
Déviateur1	1017,13	0,232	0,464	0,12	135,50	5,42%
Déviateur2	1036,38	0,232	0,697	0,12	200,48	8,02%
Appui 26	1046,00	0,232	0,929	0,12	263,66	10,55%
Appui 26	1046,00	0,232	0,232	0,12	68,70	2,75%
Déviateur1	1055,63	0,232	0,464	0,12	135,50	5,42%
Déviateur2	1074,88	0,232	0,697	0,12	200,48	8,02%
Appui 27	1084,50	0,232	0,929	0,12	263,66	10,55%
Appui 27	1084,50	0,175	0,175	0,12	52,04	2,08%
Déviateur1	1097,25	0,175	0,351	0,12	102,99	4,12%
Déviateur2	1122,75	0,175	0,526	0,12	152,88	6,12%
Appui 28	1135,50	0,175	0,701	0,12	201,73	8,07%
Appui 28	1135,50	0,175	0,175	0,12	52,04	2,08%
Déviateur1	1148,25	0,175	0,351	0,12	102,99	4,12%
Déviateur2	1173,75	0,175	0,526	0,12	152,88	6,12%
Appui 29	1186,50	0,175	0,701	0,12	201,73	8,07%
Appui 29	1186,50	0,175	0,175	0,12	52,04	2,08%
Déviateur1	1199,25	0,175	0,351	0,12	102,99	4,12%
Déviateur2	1224,75	0,175	0,526	0,12	152,88	6,12%
Appui 30	1237,50	0,175	0,701	0,12	201,73	8,07%
Appui 30	1237,50	0,175	0,175	0,12	52,04	2,08%
Déviateur1	1250,25	0,175	0,351	0,12	102,99	4,12%

Déviateur2	1275,75	0,175	0,526	0,12	152,88	6,12%
Appui 31	1288,50	0,175	0,701	0,12	201,73	8,07%
Appui 31	1288,50	0,199	0,199	0,12	58,89	2,36%
Déviateur1	1299,75	0,199	0,397	0,12	116,40	4,66%
Déviateur2	1322,25	0,199	0,596	0,12	172,54	6,90%
Appui 32	1333,50	0,199	0,795	0,12	227,37	9,10%
Appui 32	1333,50	0,199	0,199	0,12	58,89	2,36%
Déviateur1	1344,75	0,199	0,397	0,12	116,40	4,66%
Déviateur2	1367,25	0,199	0,596	0,12	172,54	6,90%
Appui 33	1378,50	0,199	0,795	0,12	227,37	9,10%
Appui 33	1378,50	0,199	0,199	0,12	58,89	2,36%
Déviateur1	1389,75	0,199	0,397	0,12	116,40	4,66%
Déviateur2	1412,25	0,199	0,596	0,12	172,54	6,90%
Appui 34	1423,50	0,199	0,795	0,12	227,37	9,10%
Appui 34	1423,50	0,221	0,221	0,12	65,35	2,61%
Déviateur1	1433,63	0,221	0,441	0,12	128,99	5,16%
Déviateur2	1453,88	0,215	0,657	0,12	189,45	7,58%
Culée 2	1464,00	0,215	0,872	0,12	248,38	9,94%

Annexe B.2. Pertes dues au recul d'ancrage

Section	L	$\alpha_i(x)$	$\sum_{i=1} \alpha_i(x)/L$	f	ψ	λ	ΔF_{anc}	$\Delta F/P_0$
Culée 1	26,50	0,329	0,0503	0,12	0,0060	11,44	345,29	13,81%
Déviateur 1		0,329					145,39	5,82%
Déviateur2		0,337					0	0,00%
Appui 1		0,337					0	0,00%
Appui 1	36,00	0,248	0,0276	0,12	0,0033	15,45	255,76	10,23%
Déviateur 1		0,248					106,77	4,27%
Déviateur2		0,248					0	0,00%
Appui 2		0,248					0	0,00%
Appui 2	36,00	0,248	0,0276	0,12	0,0033	15,45	255,76	10,23%
Déviateur 1		0,248					106,77	4,27%
Déviateur2		0,248					0	0,00%
Appui 3		0,248					0	0,00%
Appui 3	37,75	0,237	0,0251	0,12	0,0030	16,20	243,90	9,76%
Déviateur 1		0,237					101,82	4,07%
Déviateur2		0,237					0	0,00%
Appui 4		0,237					0	0,00%
Appui 4	25,75	0,347	0,0539	0,12	0,0065	11,05	357,57	14,30%
Déviateur 1		0,347					149,27	5,97%
Déviateur2		0,347					0	0,00%
Appui 5		0,347					0	0,00%
Appui 5	25,75	0,347	0,0539	0,12	0,0065	11,05	357,57	14,30%
Déviateur 1		0,347					149,27	5,97%
Déviateur2		0,347					0	0,00%
Appui 6		0,347					0	0,00%
Appui 6	25,75	0,347	0,0539	0,12	0,0065	11,05	357,57	14,30%
Déviateur 1		0,347					149,27	5,97%
Déviateur2		0,347					0	0,00%
Appui 7		0,347					0	0,00%
Appui 7	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0	0,00%
Appui 8		0,185					0	0,00%
Appui 8	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur 1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0	0,00%
Appui 9		0,185					0	0,00%
Appui 9	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur 1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0	0,00%

Appui 10		0,185					0	0,00%
Appui 10	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur 1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0	0,00%
Appui 11		0,185					0	0,00%
Appui 11	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur 1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0	0,00%
Appui 12		0,185					0	0,00%
Appui 12	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur 1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0	0,00%
Appui 13		0,185					0	0,00%
Appui 13	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur 1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0	0,00%
Appui 14		0,185					0	0,00%
Appui 14	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur 1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0	0,00%
Appui 15		0,185					0	0,00%
Appui 15	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur 1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0	0,00%
Appui 16		0,185					0	0,00%
Appui 16	48,25	0,185	0,0154	0,12	0,0018	20,71	190,83	7,63%
Déviateur 1		0,185					79,66	3,19%
Déviateur2		0,185					0	0,00%
Appui 17		0,185					0	0,00%
Appui 17	51,00	0,185	0,0139	0,12	0,0017	21,73	181,82	7,27%
Déviateur 1		0,175					75,15	3,01%
Déviateur2		0,175					0	0,00%
Appui 18		0,175					0	0,00%
Appui 18	51	0,175	0,0137	0,12	0,0016	21,89	180,54	7,22%
Déviateur 1	51	0,175	0,0137	0,12	0,0016	21,89	75,37	3,01%
Déviateur2		0,175					0	0,00%
Appui 19		0,175					0	0,00%
Appui 19	30,00	0,175	0,0356	0,12	0,0043	13,59	290,69	11,63%
Déviateur 1		0,298					130,30	5,21%
Déviateur2		0,298					0	0,00%
Appui 20		0,298					0	0,00%
Appui 20	30,00	0,298	0,0397	0,12	0,0048	12,87	306,91	12,28%
Déviateur 1		0,298					128,12	5,13%

Déviateur2		0,298					0	0,00%					
Appui 21		0,298					0	0,00%					
Appui 21	30,00	0,298	0,0397	0,12	0,0048	12,87	306,91	12,28%					
Déviateur 1		0,298					128,12	5,13%					
Déviateur2		0,298					0	0,00%					
Appui 22		0,298					0	0,00%					
Appui 22		0,298					306,91	12,28%					
Déviateur 1	30,00	0,298	0,0397	0,12	0,0048	12,87	128,12	5,13%					
Déviateur2		0,298					0	0,00%					
Appui 23		0,298					0	0,00%					
Appui 23		0,175					207,79	8,31%					
Déviateur 1	89,50	0,175	0,0182	0,12	0,0022	19,02	68,47	2,74%					
Déviateur2		0,175					0	0,00%					
Appui 24		0,175					0	0,00%					
Appui 24		0,232					207,79	8,31%					
Déviateur 1		0,232					102,62	4,10%					
Déviateur2		0,232					0	0,00%					
Appui 25		0,232					0	0,00%					
Appui 25		0,232					239,15	9,57%					
Déviateur 1		77,00					0,232	0,0241	0,12	0,0029	16,52	99,84	3,99%
Déviateur2							0,232					0	0,00%
Appui 26	0,232		0	0,00%									
Appui 26	0,232		239,15	9,57%									
Déviateur 1	0,232		99,84	3,99%									
Déviateur2	0,232		0	0,00%									
Appui 27	0,232		0	0,00%									
Appui 27	0,175		180,54	7,22%									
Déviateur 1	51,00	0,175	0,0137	0,12	0,0016	21,89	75,37	3,01%					
Déviateur2		0,175					0	0,00%					
Appui 28		0,175					0	0,00%					
Appui 28	51,00	0,175	0,0137	0,12	0,0016	21,89	180,54	7,22%					
Déviateur 1		0,175					75,37	3,01%					
Déviateur2		0,175					0	0,00%					
Appui 29		0,175					0	0,00%					
Appui 29	51,00	0,175	0,0137	0,12	0,0016	21,89	180,54	7,22%					
Déviateur 1		0,175					75,37	3,01%					
Déviateur2	51	0,175	0,0014	0,12	0,0016	21,89	0	0,00%					
Appui 30		0,175					0	0,00%					
Appui 30	51,00	0,175	0,0137	0,12	0,0016	21,89	180,54	7,22%					
Déviateur 1		0,175					75,37	3,01%					
Déviateur2		0,175					0	0,00%					
Appui 31		0,175					0	0,00%					
Appui 31	45,00	0,199	0,0177	0,12	0,0021	19,31	204,61	8,18%					

Déviateur 1		0,199					85,41	3,42%
Déviateur2		0,199					0	0,00%
Appui 32		0,199					0	0,00%
Appui 32	45,00	0,199	0,0177	0,12	0,0021	19,31	204,61	8,18%
Déviateur 1		0,199					85,41	3,42%
Déviateur2		0,199					0	0,00%
Appui 33		0,199					0	0,00%
Appui 33	45,00	0,199	0,0177	0,12	0,0021	19,31	204,61	8,18%
Déviateur 1		0,199					85,41	3,42%
Déviateur2		0,199					0	0,00%
Appui 34		0,199					0	0,00%
Appui 34	40,50	0,221	0,0215	0,12	0,0026	17,49	225,93	9,04%
Déviateur 1		0,221					95,13	3,81%
Déviateur2		0,215					0	0,00%
Culée 2		0,215					0	0,00%

Annexe B.3. Pertes dues au non simultanéité des mises en tension

Section	ΔF_{Fr}	ΔF_{anc}	P	M	$\sigma_b(x)$	ΔF_{n-s}	$\Delta F/P_0$
Cul��e 1	96,78	345,29	24693,25	0	4,76	11,03	0,44%
D��viateur 1	96,78	145,4	27092,06	7222,91	10,39	24,05	0,96%
D��viateur2	99,18	0,0	28807,92	-1588,41	9,72	22,51	0,90%
Appui 1	99,18	0,0	28807,92	-17599,25	7,18	16,63	0,67%
Appui 1	73,40	255,8	26048,22	-17599,25	6,63	15,34	0,61%
D��viateur 1	73,40	106,8	27836,10	3523,53	10,12	23,42	0,94%
D��viateur2	73,40	0,0	29117,33	2879,01	10,47	24,23	0,97%
Appui 2	73,40	0,0	29117,33	-18888,3	7,35	17,00	0,68%
Appui 2	73,40	255,8	26048,22	-18888,3	6,73	15,57	0,62%
D��viateur 1	73,40	106,8	27836,10	1973,54	9,90	22,91	0,92%
D��viateur2	73,40	0,0	29117,33	807,12	10,17	23,55	0,94%
Appui 3	73,40	0,0	29117,33	-21221,14	7,53	17,43	0,70%
Appui 3	70,04	243,9	26230,74	-21221,14	6,95	16,08	0,64%
D��viateur 1	70,04	101,8	27935,75	3541,96	10,16	23,51	0,94%
D��viateur2	70,04	0,0	29157,58	5909,53	10,92	25,27	1,01%
Appui 4	70,04	0,0	29157,58	-16487,79	7,16	16,59	0,66%
Appui 4	102,01	357,6	24483,18	-16487,79	6,22	14,41	0,58%
D��viateur 1	102,01	149,3	26982,75	-3658,5	8,80	20,36	0,81%
D��viateur2	102,01	0,0	28773,97	0	9,94	23,01	0,92%
Appui 5	102,01	0,0	28773,97	-9014,89	6,50	15,05	0,60%
Appui 5	102,01	357,6	24483,18	-9014,89	5,64	13,05	0,52%
D��viateur 1	102,01	149,3	26982,75	2709	9,71	22,47	0,90%
D��viateur2	102,01	0,0	28773,97	4244,05	10,55	24,41	0,98%
Appui 6	102,01	0,0	28773,97	-5968,71	6,26	14,49	0,58%
Appui 6	102,01	357,6	24483,18	-5968,71	5,40	12,49	0,50%
D��viateur 1	102,01	149,3	26982,75	85,85	9,33	21,60	0,86%
D��viateur2	102,01	0,0	28773,97	-9735,42	8,55	19,78	0,79%
Appui 7	102,01	0,0	28773,97	-25626,34	7,81	18,07	0,72%
Appui 7	54,97	190,8	27048,55	-25626,34	7,46	17,27	0,69%
D��viateur 1	54,97	79,7	28382,52	10160,42	11,26	26,06	1,04%
D��viateur2	54,97	0,0	29338,46	4720,48	10,81	25,02	1,00%
Appui 8	54,97	0,0	29338,46	-36551,05	8,78	20,32	0,81%
Appui 8	54,97	190,8	27048,55	-36551,05	8,32	19,25	0,77%
D��viateur 1	54,97	79,7	28382,52	2697,97	10,19	23,59	0,94%
D��viateur2	54,97	0,0	29338,46	4182,57	10,73	24,84	0,99%
Appui 9	54,97	0,0	29338,46	-33623,82	8,55	19,79	0,79%
Appui 9	54,97	190,8	27048,55	-33623,82	8,09	18,72	0,75%
D��viateur 1	54,97	79,7	28382,52	4697,54	10,48	24,25	0,97%
D��viateur2	54,97	0,0	29338,46	4311,8	10,75	24,89	1,00%

Appui 10	54,97	0,0	29338,46	-34408,01	8,61	19,93	0,80%
Appui 10	54,97	190,8	27048,55	-34408,01	8,15	18,86	0,75%
Déviateur 1	54,97	79,7	28382,52	4161,73	10,40	24,07	0,96%
Déviateur2	54,97	0,0	29338,46	4287,75	10,75	24,88	1,00%
Appui 11	54,97	0,0	29338,46	-34198,49	8,59	19,89	0,80%
Appui 11	54,97	190,8	27048,55	-34198,49	8,13	18,83	0,75%
Déviateur 1	54,97	79,7	28382,52	4305,41	10,42	24,12	0,96%
Déviateur2	54,97	0,0	29338,46	4299,75	10,75	24,88	1,00%
Appui 12	54,97	0,0	29338,46	-34252,38	8,60	19,90	0,80%
Appui 12	54,97	190,8	27048,55	-34252,38	8,14	18,84	0,75%
Déviateur 1	54,97	79,7	28382,52	4266,5	10,41	24,11	0,96%
Déviateur2	54,97	0,0	29338,46	4290,81	10,75	24,88	1,00%
Appui 13	54,97	0,0	29338,46	-34246,32	8,60	19,90	0,80%
Appui 13	54,97	190,8	27048,55	-34246,32	8,14	18,84	0,75%
Déviateur 1	54,97	79,7	28382,52	4278,46	10,42	24,11	0,96%
Déviateur2	54,97	0,0	29338,46	4314,57	10,75	24,89	1,00%
Appui 14	54,97	0,0	29338,46	-34216,67	8,60	19,90	0,80%
Appui 14	54,97	190,8	27048,55	-34216,67	8,13	18,83	0,75%
Déviateur 1	54,97	79,7	28382,52	4269,53	10,41	24,11	0,96%
Déviateur2	54,97	0,0	29338,46	4228,49	10,74	24,86	0,99%
Appui 15	54,97	0,0	29338,46	-34341,35	8,60	19,92	0,80%
Appui 15	54,97	190,8	27048,55	-34341,35	8,14	18,85	0,75%
Déviateur 1	54,97	79,7	28382,52	4293,26	10,42	24,12	0,96%
Déviateur2	54,97	0,0	29338,46	4549,04	10,78	24,96	1,00%
Appui 16	54,97	0,0	29338,46	-33872,27	8,57	19,83	0,79%
Appui 16	54,97	190,8	27048,55	-33872,27	8,11	18,77	0,75%
Déviateur 1	54,97	79,7	28382,52	4207,28	10,41	24,09	0,96%
Déviateur2	54,97	0,0	29338,46	3352,93	10,61	24,57	0,98%
Appui 17	54,97	0,0	29338,46	-35623,9	8,71	20,15	0,81%
Appui 17	54,97	181,8	27156,65	-35623,9	8,27	19,14	0,77%
Déviateur 1	52,04	75,1	28471,86	6006,33	10,69	24,75	0,99%
Déviateur2	52,04	0,0	29373,65	3188,77	10,60	24,54	0,98%
Appui 18	52,04	0,0	29373,65	-41259,03	9,16	21,19	0,85%
Appui 18	52,04	180,5	27207,22	-41259,03	8,72	20,19	0,81%
Déviateur 1	52,04	75,4	28469,26	4874,39	10,53	24,38	0,98%
Déviateur2	52,04	0,0	29373,65	11063,22	11,73	27,15	1,09%
Appui 19	52,04	0,0	29373,65	-28881,38	8,18	18,94	0,76%
Appui 19	52,04	290,7	25885,43	-28881,38	7,48	17,32	0,69%
Déviateur 1	87,81	130,3	27380,69	-8949,5	8,18	18,93	0,76%
Déviateur2	87,81	0,0	28944,30	2332,83	10,33	23,91	0,96%
Appui 20	87,81	0,0	28944,30	-8723,43	6,51	15,07	0,60%
Appui 20	87,81	306,9	25261,37	-8723,43	5,77	13,36	0,53%
Déviateur 1	87,81	128,1	27406,83	4437,07	10,10	23,38	0,94%

Déviateur2	87,81	0,0	28944,30	973,28	10,14	23,46	0,94%
Appui 21	87,81	0,0	28944,30	-15651,01	7,06	16,33	0,65%
Appui 21	87,81	306,9	25261,37	-15651,01	6,31	14,62	0,58%
Déviateur 1	87,81	128,1	27406,83	1129,48	9,63	22,29	0,89%
Déviateur2	87,81	0,0	28944,30	4905,66	10,70	24,77	0,99%
Appui 22	87,81	0,0	28944,30	-8098,64	6,46	14,96	0,60%
Appui 22	87,81	306,9	25261,37	-8098,64	5,72	13,24	0,53%
Déviateur 1	87,81	128,1	27406,83	973,28	9,61	22,24	0,89%
Déviateur2	87,81	0,0	28944,30	-10667,66	8,47	19,61	0,78%
Appui 23	87,81	0,0	28944,30	-31380,52	8,29	19,20	0,77%
Appui 23	52,04	207,8	67200,52	-31380,51	15,99	39,04	1,56%
Déviateur 1	52,04	68,5	71379,99	11081,6	26,24	64,06	2,56%
Déviateur2	52,04	0,0	73434,13	9927,8	26,78	65,38	2,62%
Appui 24	52,04	0,0	73434,13	-33688,11	17,43	42,55	1,70%
Appui 24	68,70	207,8	66700,70	-33688,11	16,07	39,24	1,57%
Déviateur 1	68,70	102,6	69855,79	-5549,7	23,33	56,96	2,28%
Déviateur2	68,70	0,0	72934,31	1679,85	25,43	62,08	2,48%
Appui 25	68,70	0,0	72934,31	-19242,24	16,19	39,53	1,58%
Appui 25	68,70	239,2	65759,77	-19242,24	14,75	36,00	1,44%
Déviateur 1	68,70	99,8	69939,24	5056,94	24,88	60,74	2,43%
Déviateur2	68,70	0,0	72934,31	4610,03	25,85	63,10	2,52%
Appui 26	68,70	0,0	72934,31	-20153,28	16,26	39,70	1,59%
Appui 26	68,70	239,2	65759,77	-20153,28	14,82	36,18	1,45%
Déviateur 1	68,70	99,8	69939,24	1666,14	24,40	59,55	2,38%
Déviateur2	68,70	0,0	72934,31	-3717,74	24,66	60,20	2,41%
Appui 27	68,70	0,0	72934,31	-30955,01	17,11	41,78	1,67%
Appui 27	52,04	180,5	27207,22	-30955,01	7,91	18,31	0,73%
Déviateur 1	52,04	75,4	28469,26	9751,4	11,23	25,99	1,04%
Déviateur2	52,04	0,0	29373,65	5086,18	10,87	25,17	1,01%
Appui 28	52,04	0,0	29373,65	-40285,45	9,08	21,02	0,84%
Appui 28	52,04	180,5	27207,22	-40285,45	8,64	20,01	0,80%
Déviateur 1	52,04	75,4	28469,26	3463,78	10,33	23,91	0,96%
Déviateur2	52,04	0,0	29373,65	4884,19	10,84	25,10	1,00%
Appui 29	52,04	0,0	29373,65	-37444,62	8,86	20,50	0,82%
Appui 29	52,04	180,5	27207,22	-37444,62	8,42	19,49	0,78%
Déviateur 1	52,04	75,4	28469,26	5086,18	10,56	24,45	0,98%
Déviateur2	52,04	0,0	29373,65	4069,74	10,73	24,83	0,99%
Appui 30	52,04	0,0	29373,65	-39477,49	9,02	20,87	0,83%
Appui 30	52,04	180,5	27207,22	-39477,49	8,58	19,86	0,79%
Déviateur 1	52,04	75,4	28469,26	4884,19	10,53	24,38	0,98%
Déviateur2	52,04	0,0	29373,65	7529,52	11,22	25,98	1,04%
Appui 31	52,04	0,0	29373,65	-34186,83	8,60	19,91	0,80%
Appui 31	58,89	204,6	26836,09	-34186,83	8,09	18,73	0,75%

Déviateur 1	58,89	85,4	28266,40	662,05	9,86	22,82	0,91%
Déviateur2	58,89	0,0	29291,38	3344,03	10,60	24,53	0,98%
Appui 32	58,89	0,0	29291,38	-28822,85	8,16	18,89	0,76%
Appui 32	58,89	204,6	26836,09	-28822,85	7,67	17,75	0,71%
Déviateur 1	58,89	85,4	28266,40	4583,13	10,42	24,12	0,96%
Déviateur2	58,89	0,0	29291,38	4379,32	10,74	24,87	0,99%
Appui 33	58,89	0,0	29291,38	-29230,46	8,19	18,97	0,76%
Appui 33	58,89	204,6	26836,09	-29230,46	7,70	17,82	0,71%
Déviateur 1	58,89	85,4	28266,40	3344,03	10,24	23,71	0,95%
Déviateur2	58,89	0,0	29291,38	1477,26	10,33	23,91	0,96%
Appui 34	58,89	0,0	29291,38	-32964	8,49	19,65	0,79%
Appui 34	65,35	225,9	26502,71	-32964	7,93	18,35	0,73%
Déviateur 1	65,35	95,1	28072,30	19706,51	12,52	28,97	1,16%
Déviateur2	63,75	0,0	29233,03	18905,25	12,80	29,64	1,19%
Culée 2	63,75	0,0	29233,03	0	7,46	17,26	0,69%

Annexe B.4. Les pertes instantanées

Section	ΔF_{frot} (kN)	ΔF_{anc} (kN)	ΔF_{simul} (kN)	$\Delta F_{\text{instantanées}}$
Culée 1	96,78	345,3	11,03	18,12%
Déviateur 1	189,81	145,4	24,05	14,37%
Déviateur2	281,46	0,0	22,51	12,16%
Appui 1	369,47	0,0	16,63	15,44%
Appui 1	73,40	255,8	15,34	13,78%
Déviateur 1	144,64	106,8	23,42	10,99%
Déviateur2	213,79	0,0	24,23	9,52%
Appui 2	280,91	0,0	17,00	11,92%
Appui 2	73,40	255,8	15,57	13,79%
Déviateur 1	144,64	106,8	22,91	10,97%
Déviateur2	213,79	0,0	23,55	9,49%
Appui 3	280,91	0,0	17,43	11,93%
Appui 3	70,04	243,9	16,08	13,20%
Déviateur 1	138,12	101,8	23,51	10,54%
Déviateur2	204,29	0,0	25,27	9,18%
Appui 4	268,61	0,0	16,59	11,41%
Appui 4	102,01	357,6	14,41	18,96%
Déviateur 1	199,86	149,3	20,36	14,78%
Déviateur2	293,71	0,0	23,01	12,67%
Appui 5	383,73	0,0	15,05	15,95%
Appui 5	102,01	357,6	13,05	18,91%
Déviateur 1	199,86	149,3	22,47	14,86%
Déviateur2	293,71	0,0	24,41	12,73%
Appui 6	383,73	0,0	14,49	15,93%
Appui 6	102,01	357,6	12,49	18,88%
Déviateur 1	199,86	149,3	21,60	14,83%
Déviateur2	293,71	0,0	19,78	12,54%
Appui 7	383,73	0,0	18,07	16,07%
Appui 7	54,97	190,8	17,27	10,52%
Déviateur 1	108,73	79,7	26,06	8,58%
Déviateur2	161,31	0,0	25,02	7,45%
Appui 8	212,73	0,0	20,32	9,32%
Appui 8	54,97	190,8	19,25	10,60%
Déviateur 1	108,73	79,7	23,59	8,48%
Déviateur2	161,31	0,0	24,84	7,45%
Appui 9	212,73	0,0	19,79	9,30%
Appui 9	54,97	190,8	18,72	10,58%
Déviateur 1	108,73	79,7	24,25	8,51%
Déviateur2	161,31	0,0	24,89	7,45%
Appui 10	212,73	0,0	19,93	9,31%

Appui 10	54,97	190,8	18,86	10,59%
Déviateur 1	108,73	79,7	24,07	8,50%
Déviateur2	161,31	0,0	24,88	7,45%
Appui 11	212,73	0,0	19,89	9,31%
Appui 11	54,97	190,8	18,83	10,59%
Déviateur 1	108,73	79,7	24,12	8,50%
Déviateur2	161,31	0,0	24,88	7,45%
Appui 12	212,73	0,0	19,90	9,31%
Appui 12	54,97	190,8	18,84	10,59%
Déviateur 1	108,73	79,7	24,11	8,50%
Déviateur2	161,31	0,0	24,88	7,45%
Appui 13	212,73	0,0	19,90	9,31%
Appui 13	54,97	190,8	18,84	10,59%
Déviateur 1	108,73	79,7	24,11	8,50%
Déviateur2	161,31	0,0	24,89	7,45%
Appui 14	212,73	0,0	19,90	9,31%
Appui 14	54,97	190,8	18,83	10,59%
Déviateur 1	108,73	79,7	24,11	8,50%
Déviateur2	161,31	0,0	24,86	7,45%
Appui 15	212,73	0,0	19,92	9,31%
Appui 15	54,97	190,8	18,85	10,59%
Déviateur 1	108,73	79,7	24,12	8,50%
Déviateur2	161,31	0,0	24,96	7,45%
Appui 16	212,73	0,0	19,83	9,30%
Appui 16	54,97	190,8	18,77	10,58%
Déviateur 1	108,73	79,7	24,09	8,50%
Déviateur2	161,31	0,0	24,57	7,44%
Appui 17	212,73	0,0	20,15	9,32%
Appui 17	54,97	181,8	19,14	10,24%
Déviateur 1	105,86	75,1	24,75	8,23%
Déviateur2	155,69	0,0	24,54	7,21%
Appui 18	204,49	0,0	21,19	9,03%
Appui 18	52,04	180,5	20,19	10,11%
Déviateur 1	102,99	75,4	24,38	8,11%
Déviateur2	152,88	0,0	27,15	7,20%
Appui 19	201,73	0,0	18,94	8,83%
Appui 19	87,81	290,7	17,32	15,83%
Déviateur 1	172,54	130,3	18,93	12,87%
Déviateur2	254,30	0,0	23,91	11,13%
Appui 20	333,18	0,0	15,07	13,93%
Appui 20	87,81	306,9	13,36	16,32%
Déviateur 1	172,54	128,1	23,38	12,96%
Déviateur2	254,30	0,0	23,46	11,11%

Appui 21	333,18	0,0	16,33	13,98%
Appui 21	87,81	306,9	14,62	16,37%
Déviateur 1	172,54	128,1	22,29	12,92%
Déviateur2	254,30	0,0	24,77	11,16%
Appui 22	333,18	0,0	14,96	13,93%
Appui 22	87,81	306,9	13,24	16,32%
Déviateur 1	172,54	128,1	22,24	12,92%
Déviateur2	254,30	0,0	19,61	10,96%
Appui 23	333,18	0,0	19,20	14,10%
Appui 23	52,04	207,8	39,04	11,96%
Déviateur 1	102,99	68,5	64,06	9,42%
Déviateur2	152,88	0,0	65,38	8,73%
Appui 24	201,73	0,0	42,55	9,77%
Appui 24	68,70	207,8	39,24	12,63%
Déviateur 1	135,50	102,6	56,96	11,80%
Déviateur2	200,48	0,0	62,08	10,50%
Appui 25	263,66	0,0	39,53	12,13%
Appui 25	68,70	239,2	36,00	13,75%
Déviateur 1	135,50	99,8	60,74	11,84%
Déviateur2	200,48	0,0	63,10	10,54%
Appui 26	263,66	0,0	39,70	12,14%
Appui 26	68,70	239,2	36,18	13,76%
Déviateur 1	135,50	99,8	59,55	11,80%
Déviateur2	200,48	0,0	60,20	10,43%
Appui 27	263,66	0,0	41,78	12,22%
Appui 27	52,04	180,5	18,31	10,04%
Déviateur 1	102,99	75,4	25,99	8,17%
Déviateur2	152,88	0,0	25,17	7,12%
Appui 28	201,73	0,0	21,02	8,91%
Appui 28	52,04	180,5	20,01	10,10%
Déviateur 1	102,99	75,4	23,91	8,09%
Déviateur2	152,88	0,0	25,10	7,12%
Appui 29	201,73	0,0	20,50	8,89%
Appui 29	52,04	180,5	19,49	10,08%
Déviateur 1	102,99	75,4	24,45	8,11%
Déviateur2	152,88	0,0	24,83	7,11%
Appui 30	201,73	0,0	20,87	8,90%
Appui 30	52,04	180,5	19,86	10,10%
Déviateur 1	102,99	75,4	24,38	8,11%
Déviateur2	152,88	0,0	25,98	7,15%
Appui 31	201,73	0,0	19,91	8,87%
Appui 31	58,89	204,6	18,73	11,29%
Déviateur 1	116,40	85,4	22,82	8,99%

Déviateur2	172,54	0,0	24,53	7,88%
Appui 32	227,37	0,0	18,89	9,85%
Appui 32	58,89	204,6	17,75	11,25%
Déviateur 1	116,40	85,4	24,12	9,04%
Déviateur2	172,54	0,0	24,87	7,90%
Appui 33	227,37	0,0	18,97	9,85%
Appui 33	58,89	204,6	17,82	11,25%
Déviateur 1	116,40	85,4	23,71	9,02%
Déviateur2	172,54	0,0	23,91	7,86%
Appui 34	227,37	0,0	19,65	9,88%
Appui 34	65,35	225,9	18,35	12,39%
Déviateur 1	128,99	95,1	28,97	10,12%
Déviateur2	189,45	0,0	29,64	8,76%
Culée 2	248,38	0,0	17,26	10,63%

Annexe B.5. Pertes dues au fluage du béton

Section	ΔF_{Inst}	P	M	σ_b	ΔF_{Fluage}	$\Delta F/P_0$
Culée 1	17,90%	29944,40	0	7,64	55,17	2,21%
Déviateur 1	13,81%	29956,66	7477,81	11,42	82,46	3,30%
Déviateur2	11,58%	29963,36	-2222,71	10,03	72,45	2,90%
Appui 1	15,09%	29952,82	-25008,25	7,99	57,74	2,31%
Appui 1	13,46%	29957,72	-25008,25	8,00	57,75	2,31%
Déviateur 1	10,42%	29966,82	-1445,26	10,14	73,26	2,93%
Déviateur2	8,92%	29971,31	-865,37	10,23	73,87	2,96%
Appui 2	11,55%	29963,42	-26862,87	8,14	58,81	2,35%
Appui 2	13,46%	29957,69	-26862,87	8,14	58,80	2,35%
Déviateur 1	10,40%	29966,87	-7378,12	9,29	67,13	2,69%
Déviateur2	8,90%	29971,38	-2026,62	10,06	72,67	2,91%
Appui 3	11,57%	29963,37	-30154,68	8,40	60,68	2,43%
Appui 3	12,87%	29959,47	-30154,68	8,40	60,67	2,43%
Déviateur 1	9,96%	29968,19	-1692,08	10,11	73,01	2,92%
Déviateur2	8,58%	29972,34	2517,19	10,71	77,37	3,09%
Appui 4	11,05%	29964,94	-23415,38	7,87	56,85	2,27%
Appui 4	18,65%	29942,12	-23415,38	7,87	56,82	2,27%
Déviateur 1	14,24%	29955,37	-7972,77	9,21	66,49	2,66%
Déviateur2	12,08%	29961,83	-1602,58	10,12	73,09	2,92%
Appui 5	15,60%	29951,28	-12806,78	7,04	50,81	2,03%
Appui 5	18,61%	29942,26	-12806,78	7,03	50,80	2,03%
Déviateur 1	14,31%	29955,15	1368,01	10,54	76,14	3,05%
Déviateur2	12,13%	29961,68	1434,98	10,55	76,22	3,05%

Appui 6	15,58%	29951,33	-10722,97	6,87	49,63	1,99%
Appui 6	18,59%	29942,32	-10722,97	6,87	49,61	1,98%
Déviateur 1	14,28%	29955,24	-3722,97	9,81	70,88	2,84%
Déviateur2	11,97%	29962,17	-17460,91	7,85	56,70	2,27%
Appui 7	15,71%	29950,96	-36379,26	8,89	64,20	2,57%
Appui 7	10,18%	29967,55	-36379,26	8,89	64,22	2,57%
Déviateur 1	7,98%	29974,13	7170,09	11,38	82,18	3,29%
Déviateur2	6,85%	29977,54	6724,16	11,32	81,73	3,27%
Appui 8	8,94%	29971,26	-51939,53	10,12	73,06	2,92%
Appui 8	10,25%	29967,34	-51939,53	10,12	73,05	2,92%
Déviateur 1	7,90%	29974,39	3857,14	10,90	78,76	3,15%
Déviateur2	6,84%	29977,55	2210,64	10,67	77,07	3,08%
Appui 9	8,92%	29971,32	-47793,16	9,79	70,71	2,83%
Appui 9	10,23%	29967,39	-47793,16	9,79	70,70	2,83%
Déviateur 1	7,92%	29974,32	6698,66	11,31	81,70	3,27%
Déviateur2	6,84%	29977,55	6140,92	11,23	81,13	3,25%
Appui 10	8,93%	29971,30	-48855,2	9,87	71,31	2,85%
Appui 10	10,23%	29967,38	-48855,2	9,87	71,30	2,85%
Déviateur 1	7,91%	29974,34	5919,34	11,20	80,89	3,24%
Déviateur2	6,84%	29977,55	6081,6	11,22	81,07	3,24%
Appui 11	8,93%	29971,30	-48628,34	9,86	71,18	2,85%
Appui 11	10,23%	29967,38	-48628,34	9,85	71,17	2,85%
Déviateur 1	7,92%	29974,33	6158,34	11,23	81,14	3,25%
Déviateur2	6,84%	29977,55	6115,26	11,23	81,10	3,24%
Appui 12	8,93%	29971,30	-48693,05	9,86	71,22	2,85%
Appui 12	10,23%	29967,38	-48693,05	9,86	71,21	2,85%
Déviateur 1	7,92%	29974,33	6108,71	11,23	81,09	3,24%
Déviateur2	6,84%	29977,55	2321,42	10,69	77,18	3,09%
Appui 13	8,93%	29971,30	-41515	9,30	67,14	2,69%
Appui 13	10,23%	29967,38	-41515	9,30	67,14	2,69%
Déviateur 1	7,92%	29974,33	6077,94	11,22	81,05	3,24%
Déviateur2	6,84%	29977,55	6147,8	11,23	81,13	3,25%
Appui 14	8,93%	29971,30	-48633,12	9,86	71,18	2,85%
Appui 14	10,23%	29967,38	-48633,12	9,86	71,18	2,85%
Déviateur 1	7,92%	29974,33	6112,26	11,23	81,09	3,24%
Déviateur2	6,84%	29977,55	5979,48	11,21	80,96	3,24%
Appui 15	8,93%	29971,30	-48773,51	9,87	71,26	2,85%
Appui 15	10,23%	29967,38	-48773,51	9,87	71,26	2,85%
Déviateur 1	7,92%	29974,33	6128,26	11,23	81,11	3,24%
Déviateur2	6,85%	29977,54	2664,88	10,74	77,53	3,10%
Appui 16	8,92%	29971,31	-41025,11	9,26	66,86	2,67%
Appui 16	10,23%	29967,39	-41025,11	9,26	66,86	2,67%
Déviateur 1	7,91%	29974,34	5981	11,21	80,95	3,24%

Déviateur2	6,83%	29977,58	4726	11,03	79,67	3,19%
Appui 17	8,93%	29971,28	-50623,2	10,01	72,31	2,89%
Appui 17	9,88%	29968,43	-50623,2	10,01	72,31	2,89%
Déviateur 1	7,64%	29975,16	8572,92	11,58	83,64	3,35%
Déviateur2	6,61%	29978,26	4526,07	11,00	79,46	3,18%
Appui 18	8,64%	29972,16	-58617,17	10,64	76,85	3,07%
Appui 18	9,75%	29968,83	-58617,17	10,64	76,85	3,07%
Déviateur 1	7,52%	29975,52	6960,49	11,35	81,97	3,28%
Déviateur2	6,59%	29978,33	2962,68	10,78	77,84	3,11%
Appui 19	8,45%	29972,72	-43554,65	9,46	68,30	2,73%
Appui 19	15,50%	29951,58	-43554,65	9,45	68,27	2,73%
Déviateur 1	12,33%	29961,09	-12749,18	8,52	61,56	2,46%
Déviateur2	10,54%	29966,47	1604,85	10,58	76,41	3,06%
Appui 20	13,58%	29957,34	-12382,28	7,00	50,58	2,02%
Appui 20	16,02%	29950,03	-12382,28	7,00	50,57	2,02%
Déviateur 1	12,40%	29960,89	6316,27	11,25	81,27	3,25%
Déviateur2	10,52%	29966,52	1384,55	10,55	76,18	3,05%
Appui 21	13,62%	29957,21	-22245,63	7,78	56,18	2,25%
Appui 21	16,06%	29949,90	-22245,63	7,78	56,17	2,25%
Déviateur 1	12,36%	29961,00	1603,98	10,58	76,40	3,06%
Déviateur2	10,57%	29966,38	2379,98	10,69	77,21	3,09%
Appui 22	13,58%	29957,36	-11505,51	6,93	50,08	2,00%
Appui 22	16,01%	29950,04	-11505,51	6,93	50,07	2,00%
Déviateur 1	12,36%	29961,01	1383,59	10,55	76,17	3,05%
Déviateur2	10,39%	29966,92	-15166,93	8,18	59,08	2,36%
Appui 23	13,72%	29956,91	-44607,2	9,54	68,88	2,76%
Appui 23	11,22%	74911,08	-44607,2	18,58	134,22	5,37%
Déviateur 1	8,09%	74934,55	6881,75	26,87	194,04	7,76%
Déviateur2	7,36%	74940,01	8003,83	27,03	195,21	7,81%
Appui 24	8,97%	74927,96	-47851,37	18,84	136,09	5,44%
Appui 24	11,90%	74905,98	-47851,37	18,84	136,06	5,44%
Déviateur 1	10,51%	74916,40	-7943,71	24,74	178,67	7,15%
Déviateur2	9,14%	74926,62	4528,73	26,53	191,59	7,66%
Appui 25	11,33%	74910,22	-25364,5	17,07	123,30	4,93%
Appui 25	13,04%	74897,44	-25364,5	17,07	123,28	4,93%
Déviateur 1	10,54%	74916,16	7219,05	26,91	194,34	7,77%
Déviateur2	9,18%	74926,32	6561,47	26,82	193,69	7,75%
Appui 26	11,34%	74910,17	-28660,87	17,33	125,17	5,01%
Appui 26	13,04%	74897,39	-28660,87	17,33	125,15	5,01%
Déviateur 1	10,49%	74916,50	2389,07	26,22	189,35	7,57%
Déviateur2	9,07%	74927,16	2130,32	26,18	189,11	7,56%
Appui 27	11,42%	74909,57	-44010,82	18,54	133,88	5,36%
Appui 27	9,68%	29969,03	-44010,82	9,49	68,56	2,74%

Déviateur 1	7,58%	29975,35	5612,43	11,16	80,58	3,22%
Déviateur2	6,52%	29978,53	-2393,74	10,01	72,31	2,89%
Appui 28	8,52%	29972,51	-57312,43	10,54	76,11	3,04%
Appui 28	9,74%	29968,85	-57312,43	10,54	76,11	3,04%
Déviateur 1	7,51%	29975,56	4923,52	11,06	79,86	3,19%
Déviateur2	6,51%	29978,54	6946,63	11,35	81,96	3,28%
Appui 29	8,51%	29972,56	-53225,96	10,22	73,79	2,95%
Appui 29	9,73%	29968,90	-53225,96	10,22	73,79	2,95%
Déviateur 1	7,52%	29975,51	7239,9	11,39	82,26	3,29%
Déviateur2	6,50%	29978,57	9764,69	11,75	84,88	3,40%
Appui 30	8,52%	29972,52	-50026,64	9,97	71,98	2,88%
Appui 30	9,74%	29968,87	-50026,64	9,97	71,97	2,88%
Déviateur 1	7,52%	29975,51	6877,42	11,34	81,88	3,28%
Déviateur2	6,54%	29978,45	2092,54	10,65	76,95	3,08%
Appui 31	8,49%	29972,62	-48574,37	9,85	71,15	2,85%
Appui 31	10,94%	29965,26	-48574,37	9,85	71,14	2,85%
Déviateur 1	8,41%	29972,85	4533,25	11,00	79,45	3,18%
Déviateur2	7,28%	29976,24	1236,8	10,53	76,06	3,04%
Appui 32	9,48%	29969,65	-40972,13	9,25	66,83	2,67%
Appui 32	10,91%	29965,37	-40972,13	9,25	66,82	2,67%
Déviateur 1	8,45%	29972,72	2784,69	10,75	77,65	3,11%
Déviateur2	7,29%	29976,20	2507,14	10,71	77,37	3,09%
Appui 33	9,48%	29969,64	-41518,83	9,30	67,14	2,69%
Appui 33	10,91%	29965,36	-41518,83	9,30	67,13	2,69%
Déviateur 1	8,44%	29972,76	1205,72	10,52	76,01	3,04%
Déviateur2	7,26%	29976,30	-1800,34	10,10	72,92	2,92%
Appui 34	9,50%	29969,57	-46850,43	9,72	70,17	2,81%
Appui 34	12,04%	29961,96	-46850,43	9,71	70,16	2,81%
Déviateur 1	9,52%	29969,52	3452,25	10,85	78,33	3,13%
Déviateur2	8,14%	29973,67	22607,73	13,59	98,14	3,93%
Culée 2	10,19%	29967,52	0	7,64	55,21	2,21%

Annexe B.6.Pertes dues à la relaxation des aciers

Section	X(m)	ΔF_{Inst}	σ_b	$\Delta F_{Relaxation}$	$\Delta F/P_0$
Culée 1	0,00	17,90%	1485,34	137,96	5,52%
Déviateur 1	6,63	10,09%	1486,50	138,30	5,53%
Déviateur2	19,88	4,28%	1487,36	138,55	5,54%
Appui 1	26,50	4,27%	1487,36	138,55	5,54%
Appui 1	26,50	13,46%	1486,00	138,15	5,53%
Déviateur 1	35,50	7,57%	1486,87	138,41	5,54%
Déviateur2	53,50	3,31%	1487,51	138,60	5,54%
Appui 2	62,50	3,25%	1487,52	138,60	5,54%
Appui 2	62,50	13,46%	1486,00	138,15	5,53%
Déviateur 1	71,50	7,55%	1486,88	138,41	5,54%
Déviateur2	89,50	3,28%	1487,51	138,60	5,54%
Appui 3	98,50	3,27%	1487,51	138,60	5,54%
Appui 3	98,50	12,87%	1486,08	138,18	5,53%
Déviateur 1	107,94	7,24%	1486,92	138,42	5,54%
Déviateur2	126,81	3,21%	1487,52	138,60	5,54%
Appui 4	136,25	3,10%	1487,54	138,60	5,54%
Appui 4	136,25	18,65%	1485,22	137,92	5,52%
Déviateur 1	142,69	10,32%	1486,46	138,29	5,53%
Déviateur2	155,56	4,42%	1487,34	138,55	5,54%
Appui 5	162,00	4,33%	1487,36	138,55	5,54%
Appui 5	162,00	18,61%	1485,23	137,93	5,52%
Déviateur 1	168,44	10,40%	1486,45	138,29	5,53%
Déviateur2	181,31	4,46%	1487,34	138,55	5,54%
Appui 6	187,75	4,31%	1487,36	138,55	5,54%
Appui 6	187,75	18,59%	1485,23	137,93	5,52%
Déviateur 1	194,19	10,37%	1486,46	138,29	5,53%
Déviateur2	207,06	4,30%	1487,36	138,55	5,54%
Appui 7	213,50	4,44%	1487,34	138,55	5,54%
Appui 7	213,50	10,18%	1486,49	138,29	5,53%
Déviateur 1	225,56	5,83%	1487,13	138,49	5,54%
Déviateur2	249,69	2,59%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 8	261,75	2,63%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 8	261,75	10,25%	1486,48	138,29	5,53%
Déviateur 1	273,81	5,75%	1487,14	138,49	5,54%
Déviateur2	297,94	2,59%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 9	310,00	2,61%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 9	310,00	10,23%	1486,48	138,29	5,53%
Déviateur 1	322,06	5,77%	1487,14	138,49	5,54%
Déviateur2	346,19	2,59%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 10	358,25	2,62%	1487,61	138,63	5,55%

Appui 10	358,25	10,23%	1486,48	138,29	5,53%
Déviateur 1	370,31	5,76%	1487,14	138,49	5,54%
Déviateur2	394,44	2,59%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 11	406,50	2,62%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 11	406,50	10,23%	1486,48	138,29	5,53%
Déviateur 1	418,56	5,77%	1487,14	138,49	5,54%
Déviateur2	442,69	2,59%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 12	454,75	2,62%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 12	454,75	10,23%	1486,48	138,29	5,53%
Déviateur 1	466,81	5,76%	1487,14	138,49	5,54%
Déviateur2	490,94	2,59%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 13	503,00	2,62%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 13	503,00	10,23%	1486,48	138,29	5,53%
Déviateur 1	515,06	5,77%	1487,14	138,49	5,54%
Déviateur2	539,19	2,59%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 14	551,25	2,62%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 14	551,25	10,23%	1486,48	138,29	5,53%
Déviateur 1	563,31	5,77%	1487,14	138,49	5,54%
Déviateur2	587,44	2,59%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 15	599,50	2,62%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 15	599,50	10,23%	1486,48	138,29	5,53%
Déviateur 1	611,56	5,77%	1487,14	138,49	5,54%
Déviateur2	635,69	2,59%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 16	647,75	2,61%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 16	647,75	10,23%	1486,48	138,29	5,53%
Déviateur 1	659,81	5,76%	1487,14	138,49	5,54%
Déviateur2	683,94	2,58%	1487,62	138,63	5,55%
Appui 17	696,00	2,62%	1487,61	138,63	5,55%
Appui 17	696,00	9,88%	1486,53	138,31	5,53%
Déviateur 1	708,75	5,49%	1487,18	138,50	5,54%
Déviateur2	734,25	2,46%	1487,63	138,63	5,55%
Appui 18	747,00	2,54%	1487,62	138,63	5,55%
Appui 18	747,00	9,75%	1486,55	138,31	5,53%
Déviateur 1	759,75	5,48%	1487,18	138,50	5,54%
Déviateur2	785,25	2,55%	1487,62	138,63	5,55%
Appui 19	798,00	2,46%	1487,63	138,63	5,55%
Appui 19	798,00	14,07%	1485,91	138,12	5,53%
Déviateur 1	805,50	8,94%	1486,67	138,35	5,53%
Déviateur2	820,50	3,88%	1487,42	138,57	5,54%
Appui 20	828,00	3,76%	1487,44	138,58	5,54%
Appui 20	828,00	16,02%	1485,62	138,04	5,52%
Déviateur 1	835,50	9,01%	1486,66	138,35	5,53%
Déviateur2	850,50	3,86%	1487,43	138,57	5,54%

Appui 21	858,00	3,81%	1487,43	138,57	5,54%
Appui 21	858,00	16,06%	1485,61	138,04	5,52%
Déviateur 1	865,50	8,97%	1486,67	138,35	5,53%
Déviateur2	880,50	3,91%	1487,42	138,57	5,54%
Appui 22	888,00	3,76%	1487,44	138,58	5,54%
Appui 22	888,00	16,01%	1485,62	138,04	5,52%
Déviateur 1	895,50	8,97%	1486,67	138,35	5,53%
Déviateur2	910,50	3,73%	1487,45	138,58	5,54%
Appui 23	918,00	3,91%	1487,42	138,57	5,54%
Appui 23	918,00	11,22%	1486,33	138,25	5,53%
Déviateur 1	930,75	6,05%	1487,10	138,48	5,54%
Déviateur2	956,25	3,33%	1487,51	138,60	5,54%
Appui 24	969,00	2,98%	1487,56	138,61	5,54%
Appui 24	969,00	11,90%	1486,23	138,22	5,53%
Déviateur 1	978,63	7,83%	1486,83	138,40	5,54%
Déviateur2	997,88	3,87%	1487,42	138,57	5,54%
Appui 25	1007,50	3,53%	1487,47	138,59	5,54%
Appui 25	1007,50	13,04%	1486,06	138,17	5,53%
Déviateur 1	1017,13	7,87%	1486,83	138,40	5,54%
Déviateur2	1036,38	3,91%	1487,42	138,57	5,54%
Appui 26	1046,00	3,54%	1487,47	138,59	5,54%
Appui 26	1046,00	13,04%	1486,06	138,17	5,53%
Déviateur 1	1055,63	7,82%	1486,84	138,40	5,54%
Déviateur2	1074,88	3,80%	1487,43	138,57	5,54%
Appui 27	1084,50	3,62%	1487,46	138,58	5,54%
Appui 27	1084,50	9,68%	1486,56	138,32	5,53%
Déviateur 1	1097,25	5,54%	1487,18	138,50	5,54%
Déviateur2	1122,75	2,48%	1487,63	138,63	5,55%
Appui 28	1135,50	2,54%	1487,62	138,63	5,55%
Appui 28	1135,50	9,74%	1486,55	138,31	5,53%
Déviateur 1	1148,25	5,47%	1487,19	138,50	5,54%
Déviateur2	1173,75	2,48%	1487,63	138,63	5,55%
Appui 29	1186,50	2,52%	1487,63	138,63	5,55%
Appui 29	1186,50	9,73%	1486,55	138,31	5,53%
Déviateur 1	1199,25	5,49%	1487,18	138,50	5,54%
Déviateur2	1224,75	2,47%	1487,63	138,63	5,55%
Appui 30	1237,50	2,53%	1487,62	138,63	5,55%
Appui 30	1237,50	9,74%	1486,55	138,31	5,53%
Déviateur 1	1250,25	5,48%	1487,18	138,50	5,54%
Déviateur2	1275,75	2,51%	1487,63	138,63	5,55%
Appui 31	1288,50	2,50%	1487,63	138,63	5,55%
Appui 31	1288,50	10,94%	1486,37	138,26	5,53%
Déviateur 1	1299,75	6,11%	1487,09	138,47	5,54%

Déviateur2	1322,25	2,74%	1487,59	138,62	5,55%
Appui 32	1333,50	2,74%	1487,59	138,62	5,55%
Appui 32	1333,50	10,91%	1486,38	138,26	5,53%
Déviateur 1	1344,75	6,15%	1487,08	138,47	5,54%
Déviateur2	1367,25	2,75%	1487,59	138,62	5,55%
Appui 33	1378,50	2,74%	1487,59	138,62	5,55%
Appui 33	1378,50	10,91%	1486,38	138,26	5,53%
Déviateur 1	1389,75	6,14%	1487,09	138,47	5,54%
Déviateur2	1412,25	2,71%	1487,60	138,62	5,55%
Appui 34	1423,50	2,76%	1487,59	138,62	5,55%
Appui 34	1423,50	12,04%	1486,21	138,21	5,53%
Déviateur 1	1433,63	6,97%	1486,96	138,44	5,54%
Déviateur2	1453,88	3,11%	1487,54	138,60	5,54%
Culée 2	1464,00	2,80%	1487,58	138,62	5,55%

Annexe B.7. Les pertes totales des câbles extérieurs

Section	ΔF_{Frot}	ΔF_{anc}	$\Delta F_{\text{n-sim}}$	ΔF_{ret}	ΔF_{flu}	$\frac{5}{6} \Delta F_{\text{rel}}$	ΔF_{Tot}
Culée 1	96,78	345,29	11,03	28,50	55,17	114,96	26,07%
Déviateur 1	189,81	145,39	24,05	28,50	82,46	115,25	23,42%
Déviateur2	281,46	0,00	22,51	28,50	72,45	115,46	20,82%
Appui 1	369,47	0,00	16,63	28,50	57,74	115,46	23,51%
Appui 1	73,40	255,76	15,34	28,50	57,75	115,13	21,84%
Déviateur 1	144,64	106,77	23,42	28,50	73,26	115,34	19,68%
Déviateur2	213,79	0,00	24,23	28,50	73,87	115,50	18,24%
Appui 2	280,91	0,00	17,00	28,50	58,81	115,50	20,03%
Appui 2	73,40	255,76	15,57	28,50	58,80	115,13	21,89%
Déviateur 1	144,64	106,77	22,91	28,50	67,13	115,34	19,41%
Déviateur2	213,79	0,00	23,55	28,50	72,67	115,50	18,16%
Appui 3	280,91	0,00	17,43	28,50	60,68	115,50	20,12%
Appui 3	70,04	243,90	16,08	28,50	60,67	115,15	21,38%
Déviateur 1	138,12	101,82	23,51	28,50	73,01	115,35	19,21%
Déviateur2	204,29	0,00	25,27	28,50	77,37	115,50	18,04%
Appui 4	268,61	0,00	16,59	28,50	56,85	115,50	19,44%
Appui 4	102,01	357,57	14,41	28,50	56,82	114,94	26,97%
Déviateur 1	199,86	149,27	20,36	28,50	66,49	115,24	23,19%
Déviateur2	293,71	0,00	23,01	28,50	73,09	115,46	21,35%
Appui 5	383,73	0,00	15,05	28,50	50,81	115,46	23,74%
Appui 5	102,01	357,57	13,05	28,50	50,80	114,94	26,68%
Déviateur 1	199,86	149,27	22,47	28,50	76,14	115,24	23,66%
Déviateur2	293,71	0,00	24,41	28,50	76,22	115,45	21,53%

Appui 6	383,73	0,00	14,49	28,50	49,63	115,46	23,67%
Appui 6	102,01	357,57	12,49	28,50	49,61	114,94	26,61%
Déviateur 1	199,86	149,27	21,60	28,50	70,88	115,24	23,42%
Déviateur2	293,71	0,00	19,78	28,50	56,70	115,46	20,57%
Appui 7	383,73	0,00	18,07	28,50	64,20	115,46	24,40%
Appui 7	54,97	190,83	17,27	28,50	64,22	115,25	18,84%
Déviateur 1	108,73	79,66	26,06	28,50	82,18	115,40	17,62%
Déviateur2	161,31	0,00	25,02	28,50	81,73	115,52	16,48%
Appui 8	212,73	0,00	20,32	28,50	73,06	115,52	18,01%
Appui 8	54,97	190,83	19,25	28,50	73,05	115,24	19,28%
Déviateur 1	108,73	79,66	23,59	28,50	78,76	115,41	17,39%
Déviateur2	161,31	0,00	24,84	28,50	77,07	115,52	16,29%
Appui 9	212,73	0,00	19,79	28,50	70,71	115,52	17,89%
Appui 9	54,97	190,83	18,72	28,50	70,70	115,24	19,16%
Déviateur 1	108,73	79,66	24,25	28,50	81,70	115,41	17,53%
Déviateur2	161,31	0,00	24,89	28,50	81,13	115,52	16,45%
Appui 10	212,73	0,00	19,93	28,50	71,31	115,52	17,92%
Appui 10	54,97	190,83	18,86	28,50	71,30	115,24	19,19%
Déviateur 1	108,73	79,66	24,07	28,50	80,89	115,41	17,49%
Déviateur2	161,31	0,00	24,88	28,50	81,07	115,52	16,45%
Appui 11	212,73	0,00	19,89	28,50	71,18	115,52	17,91%
Appui 11	54,97	190,83	18,83	28,50	71,17	115,24	19,18%
Déviateur 1	108,73	79,66	24,12	28,50	81,14	115,41	17,50%
Déviateur2	161,31	0,00	24,88	28,50	81,10	115,52	16,45%
Appui 12	212,73	0,00	19,90	28,50	71,22	115,52	17,92%
Appui 12	54,97	190,83	18,84	28,50	71,21	115,24	19,18%
Déviateur 1	108,73	79,66	24,11	28,50	81,09	115,41	17,50%
Déviateur2	161,31	0,00	24,88	28,50	77,18	115,52	16,30%
Appui 13	212,73	0,00	19,90	28,50	67,14	115,52	17,75%
Appui 13	54,97	190,83	18,84	28,50	67,14	115,24	19,02%
Déviateur 1	108,73	79,66	24,11	28,50	81,05	115,41	17,50%
Déviateur2	161,31	0,00	24,89	28,50	81,13	115,52	16,46%
Appui 14	212,73	0,00	19,90	28,50	71,18	115,52	17,91%
Appui 14	54,97	190,83	18,83	28,50	71,18	115,24	19,18%
Déviateur 1	108,73	79,66	24,11	28,50	81,09	115,41	17,50%
Déviateur2	161,31	0,00	24,86	28,50	80,96	115,52	16,45%
Appui 15	212,73	0,00	19,92	28,50	71,26	115,52	17,92%
Appui 15	54,97	190,83	18,85	28,50	71,26	115,24	19,19%
Déviateur 1	108,73	79,66	24,12	28,50	81,11	115,41	17,50%
Déviateur2	161,31	0,00	24,96	28,50	77,53	115,52	16,31%
Appui 16	212,73	0,00	19,83	28,50	66,86	115,52	17,74%
Appui 16	54,97	190,83	18,77	28,50	66,86	115,24	19,01%
Déviateur 1	108,73	79,66	24,09	28,50	80,95	115,41	17,49%

Déviateur2	161,31	0,00	24,57	28,50	79,67	115,52	16,38%
Appui 17	212,73	0,00	20,15	28,50	72,31	115,52	17,97%
Appui 17	54,97	181,82	19,14	28,50	72,31	115,26	18,88%
Déviateur 1	105,86	75,15	24,75	28,50	83,64	115,42	17,33%
Déviateur2	155,69	0,00	24,54	28,50	79,46	115,53	16,15%
Appui 18	204,49	0,00	21,19	28,50	76,85	115,52	17,86%
Appui 18	52,04	180,54	20,19	28,50	76,85	115,26	18,94%
Déviateur 1	102,99	75,37	24,38	28,50	81,97	115,42	17,15%
Déviateur2	152,88	0,00	27,15	28,50	77,84	115,52	16,08%
Appui 19	201,73	0,00	18,94	28,50	68,30	115,53	17,32%
Appui 19	87,81	290,69	17,32	28,50	68,27	115,10	24,31%
Déviateur 1	172,54	130,30	18,93	28,50	61,56	115,29	21,09%
Déviateur2	254,30	0,00	23,91	28,50	76,41	115,48	19,95%
Appui 20	333,18	0,00	15,07	28,50	50,58	115,48	21,71%
Appui 20	87,81	306,91	13,36	28,50	50,57	115,03	24,09%
Déviateur 1	172,54	128,12	23,38	28,50	81,27	115,29	21,97%
Déviateur2	254,30	0,00	23,46	28,50	76,18	115,48	19,92%
Appui 21	333,18	0,00	16,33	28,50	56,18	115,48	21,99%
Appui 21	87,81	306,91	14,62	28,50	56,17	115,03	24,36%
Déviateur 1	172,54	128,12	22,29	28,50	76,40	115,29	21,73%
Déviateur2	254,30	0,00	24,77	28,50	77,21	115,47	20,01%
Appui 22	333,18	0,00	14,96	28,50	50,08	115,48	21,69%
Appui 22	87,81	306,91	13,24	28,50	50,07	115,03	24,06%
Déviateur 1	172,54	128,12	22,24	28,50	76,17	115,29	21,72%
Déviateur2	254,30	0,00	19,61	28,50	59,08	115,48	19,08%
Appui 23	333,18	0,00	19,20	28,50	68,88	115,47	22,61%
Appui 23	52,04	207,79	39,04	28,50	134,22	115,21	23,07%
Déviateur 1	102,99	68,47	64,06	28,50	194,04	115,40	22,94%
Déviateur2	152,88	0,00	65,38	28,50	195,21	115,50	22,30%
Appui 24	201,73	0,00	42,55	28,50	136,09	115,51	20,98%
Appui 24	68,70	207,79	39,24	28,50	136,06	115,18	23,82%
Déviateur 1	135,50	102,62	56,96	28,50	178,67	115,33	24,71%
Déviateur2	200,48	0,00	62,08	28,50	191,59	115,48	23,93%
Appui 25	263,66	0,00	39,53	28,50	123,30	115,49	22,82%
Appui 25	68,70	239,15	36,00	28,50	123,28	115,14	24,43%
Déviateur 1	135,50	99,84	60,74	28,50	194,34	115,33	25,37%
Déviateur2	200,48	0,00	63,10	28,50	193,69	115,47	24,05%
Appui 26	263,66	0,00	39,70	28,50	125,17	115,49	22,90%
Appui 26	68,70	239,15	36,18	28,50	125,15	115,14	24,51%
Déviateur 1	135,50	99,84	59,55	28,50	189,35	115,33	25,12%
Déviateur2	200,48	0,00	60,20	28,50	189,11	115,48	23,75%
Appui 27	263,66	0,00	41,78	28,50	133,88	115,49	23,33%
Appui 27	52,04	180,54	18,31	28,50	68,56	115,26	18,53%

Déviateur 1	102,99	75,37	25,99	28,50	36,96	115,42	15,41%
Déviateur2	152,88	0,00	25,17	28,50	28,69	115,53	14,03%
Appui 28	201,73	0,00	21,02	28,50	50,70	115,52	16,70%
Appui 28	52,04	180,54	20,01	28,50	50,70	115,26	17,88%
Déviateur 1	102,99	75,37	23,91	28,50	36,25	115,42	15,30%
Déviateur2	152,88	0,00	25,10	28,50	38,34	115,53	14,41%
Appui 29	201,73	0,00	20,50	28,50	48,38	115,53	16,59%
Appui 29	52,04	180,54	19,49	28,50	48,38	115,26	17,77%
Déviateur 1	102,99	75,37	24,45	28,50	38,64	115,42	15,42%
Déviateur2	152,88	0,00	24,83	28,50	41,25	115,53	14,52%
Appui 30	201,73	0,00	20,87	28,50	46,56	115,53	16,53%
Appui 30	52,04	180,54	19,86	28,50	46,56	115,26	17,71%
Déviateur 1	102,99	75,37	24,38	28,50	38,26	115,42	15,40%
Déviateur2	152,88	0,00	25,98	28,50	33,32	115,53	14,25%
Appui 31	201,73	0,00	19,91	28,50	45,74	115,53	16,46%
Appui 31	58,89	204,61	18,73	28,50	45,73	115,22	18,87%
Déviateur 1	116,40	85,41	22,82	28,50	35,84	115,39	16,18%
Déviateur2	172,54	0,00	24,53	28,50	32,44	115,52	14,94%
Appui 32	227,37	0,00	18,89	28,50	41,42	115,52	17,27%
Appui 32	58,89	204,61	17,75	28,50	41,41	115,22	18,66%
Déviateur 1	116,40	85,41	24,12	28,50	34,03	115,39	16,16%
Déviateur2	172,54	0,00	24,87	28,50	33,75	115,52	15,01%
Appui 33	227,37	0,00	18,97	28,50	41,73	115,52	17,28%
Appui 33	58,89	204,61	17,82	28,50	41,73	115,22	18,67%
Déviateur 1	116,40	85,41	23,71	28,50	32,40	115,39	16,07%
Déviateur2	172,54	0,00	23,91	28,50	29,30	115,52	14,79%
Appui 34	227,37	0,00	19,65	28,50	44,76	115,52	17,43%
Appui 34	65,35	225,93	18,35	28,50	44,75	115,18	19,92%
Déviateur 1	128,99	95,13	28,97	28,50	34,72	115,36	17,27%
Déviateur2	189,45	0,00	29,64	28,50	54,52	115,50	16,71%
Culée 2	248,38	0,00	17,26	28,50	23,01	115,52	17,31%

Annexe C

Pertes de précontrainte de poussage pour le Tronçon 1

Annexe C.1. Pertes dues au frottement

Section	X(m)	$\alpha_i(x)$	f	φ	ΔF_{Fr}	$\Delta F_{Fro}/P_0$
Culée 1	0,00	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur 1	6,63	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	19,88	0,3015	0,19	0,0016	188,70	7,55%
Appui 1	26,50	0,3015	0,19	0,0016	164,07	6,56%
Déviateur 1	35,50	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	53,50	0,3015	0,19	0,0016	206,20	8,25%
Appui 2	62,50	0,3015	0,19	0,0016	172,93	6,92%
Déviateur 1	71,50	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	89,50	0,3015	0,19	0,0016	206,20	8,25%
Appui 3	98,50	0,3015	0,19	0,0016	172,93	6,92%
Déviateur 1	107,94	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	126,81	0,3015	0,19	0,0016	209,41	8,38%
Appui 4	136,25	0,3015	0,19	0,0016	174,56	6,98%
Déviateur 1	142,69	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	155,56	0,3015	0,19	0,0016	187,31	7,49%
Appui 5	162,00	0,3015	0,19	0,0016	163,37	6,54%
Déviateur 1	168,44	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	181,31	0,3015	0,19	0,0016	187,31	7,49%
Appui 6	187,75	0,3015	0,19	0,0016	163,37	6,54%
Déviateur 1	194,19	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	207,06	0,3015	0,19	0,0016	187,31	7,49%
Appui 7	213,50	0,3015	0,19	0,0016	163,37	6,54%
Déviateur 1	225,56	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	249,69	0,3015	0,19	0,0016	228,56	9,14%
Appui 8	261,75	0,3015	0,19	0,0016	184,30	7,37%
Déviateur 1	273,81	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	297,94	0,3015	0,19	0,0016	228,56	9,14%
Appui 9	310,00	0,3015	0,19	0,0016	184,30	7,37%
Déviateur 1	322,06	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	346,19	0,3015	0,19	0,0016	228,56	9,14%
Appui 10	358,25	0,3015	0,19	0,0016	184,30	7,37%
Déviateur 1	370,31	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	394,44	0,3015	0,19	0,0016	228,56	9,14%
Appui 11	406,50	0,3015	0,19	0,0016	184,30	7,37%
Déviateur 1	418,56	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%

Déviateur2	442,69	0,3015	0,19	0,0016	228,56	9,14%
Appui 12	454,75	0,3015	0,19	0,0016	184,30	7,37%
Déviateur 1	466,81	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	490,94	0,3015	0,19	0,0016	228,56	9,14%
Appui 13	503,00	0,3015	0,19	0,0016	184,30	7,37%
Déviateur 1	515,06	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	539,19	0,3015	0,19	0,0016	228,56	9,14%
Appui 14	551,25	0,3015	0,19	0,0016	184,30	7,37%
Déviateur 1	563,31	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	587,44	0,3015	0,19	0,0016	228,56	9,14%
Appui 15	599,50	0,3015	0,19	0,0016	184,30	7,37%
Déviateur 1	611,56	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	635,69	0,3015	0,19	0,0016	228,56	9,14%
Appui 16	647,75	0,3015	0,19	0,0016	184,30	7,37%
Déviateur 1	659,81	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	683,94	0,3015	0,19	0,0016	228,56	9,14%
Appui 17	696,00	0,3015	0,19	0,0016	184,30	7,37%
Déviateur 1	708,75	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	734,25	0,3015	0,19	0,0016	233,56	9,34%
Appui 18	747,00	0,3015	0,19	0,0016	186,85	7,47%
Déviateur 1	759,75	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	785,25	0,3015	0,19	0,0016	233,56	9,34%
Appui 19	798,00	0,3015	0,19	0,0016	186,85	7,47%
Déviateur 1	805,50	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	820,50	0,3015	0,19	0,0016	195,16	7,81%
Appui 20	828,00	0,3015	0,19	0,0016	167,34	6,69%
Déviateur 1	835,50	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	850,50	0,3015	0,19	0,0016	195,16	7,81%
Appui 21	858,00	0,3015	0,19	0,0016	167,34	6,69%
Déviateur 1	865,50	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	880,50	0,3015	0,19	0,0016	195,16	7,81%
Appui 22	888,00	0,3015	0,19	0,0016	167,34	6,69%
Déviateur 1	895,50	0,3015	0,19	0,0016	139,18	5,57%
Déviateur2	910,50	0,3015	0,19	0,0016	195,16	7,81%
Appui 23	918,00	0,3015	0,19	0,0016	167,34	6,69%

Annexe C.2. Pertes dues au recul d'ancrage

Section	L (m)	α/L	f	φ	ψ	λ	ΔF_{anc}	$\Delta F_{\text{anc}}/P_0$
Culée 1	13,25	0,0228	0,19	0,0016	0,005923	11,55	342,08	13,68%
Déviateur1	13,25	0,0228			0,005923	11,55	342,08	13,68%
Déviateur2	13,25	0,0228			0,005923	11,55	0	0,00%
Appui 1	15,63	0,0193			0,005266	12,25	148,12	5,92%
Déviateur1	18,00	0,0168	0,19	0,002	0,004783	12,86	307,38	12,30%
Déviateur2	18,00	0,0168			0,004783	12,86	0	0,00%
Appui 2	18,00	0,0168			0,004783	12,86	92,18	3,69%
Déviateur1	18,00	0,0168	0,19	0,002	0,004783	12,86	307,38	12,30%
Déviateur2	18,00	0,0168			0,004783	12,86	0	0,00%
Appui 3	18,44	0,0164			0,004707	12,96	93,14	3,73%
Déviateur1	18,88	0,0160	0,19	0,002	0,004635	13,06	302,60	12,10%
Déviateur2	18,88	0,0160			0,004635	13,06	0	0,00%
Appui 4	15,88	0,0190			0,005209	12,32	75,01	3,00%
Déviateur1	12,88	0,0234	0,19	0,002	0,006049	11,43	345,70	13,83%
Déviateur2	12,88	0,0234			0,006049	11,43	0	0,00%
Appui 5	12,88	0,0234			0,006049	11,43	151,00	6,04%
Déviateur1	12,88	0,0234	0,19	0,002	0,006049	11,43	345,70	13,83%
Déviateur2	12,88	0,0234			0,006049	11,43	0	0,00%
Appui 6	12,88	0,0234			0,006049	11,43	150,999	6,04%
Déviateur1	12,88	0,0234	0,19	0,002	0,006049	11,43	345,699	13,83%
Déviateur2	12,88	0,0234			0,006049	11,43	0	0,00%
Appui 7	18,50	0,0163			0,004696	12,97	153,44	6,14%
Déviateur1	24,13	0,0125	0,19	0,002	0,003975	14,10	280,21	11,21%
Déviateur2	24,13	0,0125			0,003975	14,10	0	0,00%
Appui 8	24,13	0,0125			0,003975	14,10	40,51	1,62%
Déviateur1	24,13	0,0125	0,19	0,002	0,003975	14,10	280,21	11,21%
Déviateur2	24,13	0,0125			0,003975	14,10	0	0,00%
Appui 9	24,13	0,0125			0,003975	14,10	40,51	1,62%
Déviateur1	24,13	0,0125	0,19	0,002	0,003975	14,10	280,21	11,21%
Déviateur2	24,13	0,0125			0,003975	14,10	0	0,00%
Appui 10	24,13	0,0125			0,003975	14,10	40,51	1,62%
Déviateur1	24,13	0,0125	0,19	0,002	0,003975	14,10	280,21	11,21%
Déviateur2	24,13	0,0125			0,003975	14,10	0	0,00%
Appui 11	24,13	0,0125			0,003975	14,10	40,51	1,62%
Déviateur1	24,13	0,0125	0,19	0,002	0,003975	14,10	280,21	11,21%
Déviateur2	24,13	0,0125			0,003975	14,10	0	0,00%
Appui 12	24,13	0,0125			0,003975	14,10	40,51	1,62%
Déviateur1	24,13	0,0125	0,19	0,002	0,003975	14,10	280,21	11,21%
Déviateur2	24,13	0,0125			0,003975	14,10	0	0,00%

Appui 13	24,13	0,0125			0,003975	14,10	40,51	1,62%
Déviateur1	24,13	0,0125	0,19	0,002	0,003975	14,10	280,21	11,21%
Déviateur2	24,13	0,0125			0,003975	14,10	0	0,00%
Appui 14	24,13	0,0125			0,003975	14,10	40,51	1,62%
Déviateur1	24,13	0,0125	0,19	0,002	0,003975	14,10	280,21	11,21%
Déviateur2	24,13	0,0125			0,003975	14,10	0	0,00%
Appui 15	24,13	0,0125			0,003975	14,10	40,51	1,62%
Déviateur1	24,13	0,0125	0,19	0,002	0,003975	14,10	280,21	11,21%
Déviateur2	24,13	0,0125			0,003975	14,10	0	0,00%
Appui 16	24,13	0,0125			0,003975	14,10	40,51	1,62%
Déviateur1	24,13	0,0125	0,19	0,002	0,003975	14,10	280,21	11,21%
Déviateur2	24,13	0,0125			0,003975	14,10	0	0,00%
Appui 17	24,81	0,0122			0,003909	14,22	42,15	1,69%
Déviateur1	25,50	0,0118	0,19	0,002	0,003846	14,33	275,66	11,03%
Déviateur2	25,50	0,0118			0,003846	14,33	0	0,00%
Appui 18	25,50	0,0118			0,003846	14,33	30,46	1,22%
Déviateur1	25,50	0,0118	0,19	0,002	0,003846	14,33	275,66	11,03%
Déviateur2	25,50	0,0118			0,003846	14,33	0	0,00%
Appui 19	20,25	0,0149			0,004429	13,36	13,47	0,54%
Déviateur1	15,00	0,0201	0,19	0,002	0,005419	12,08	327,19	13,09%
Déviateur2	15,00	0,0201			0,005419	12,08	0	0,00%
Appui 20	15,00	0,0201			0,005419	12,08	123,99	4,96%
Déviateur1	15,00	0,0201	0,19	0,002	0,005419	12,08	327,19	13,09%
Déviateur2	15,00	0,0201			0,005419	12,08	0	0,00%
Appui 21	15,00	0,0201			0,005419	12,08	123,99	4,96%
Déviateur1	15,00	0,0201	0,19	0,002	0,005419	12,08	327,19	13,09%
Déviateur2	15,00	0,0201			0,005419	12,08	0	0,00%
Appui 22	15,00	0,0201			0,005419	12,08	123,99	4,96%
Déviateur1	15,00	0,0201	0,19	0,002	0,005419	12,08	327,19	13,09%
Déviateur2	15,00	0,0201			0,005419	12,08	0	0,00%
Appui 23	7,50	0,0402			0,009238	9,25	80,80	3,23%

Annexe C.3.Pertes dues au non simultanéité des mises en tension

Section	ΔF_{fro}	ΔF_{an}	P	M	$\sigma_b(x)$	ΔF_{n-sim}	$\Delta F/p_0$
Cul��e 1	139,18	342,0	40371,59	0	11,23	28,40	1,14%
D��viateur 1	139,18	232,3	21284,03	7222,91	11,05	26,46	1,06%
D��viateur2	188,70	51,4	22597,72	-1588,41	10,08	24,14	0,97%
Appui 1	164,07	137,2	43971,75	-17599,25	14,31	36,16	1,45%
D��viateur 1	139,18	307,4	20532,84	3523,53	10,04	24,05	0,96%
D��viateur2	206,20	0,0	22936,44	2879,01	11,03	26,42	1,06%
Appui 2	172,93	92,2	44694,65	-18888,3	14,66	37,05	1,48%
D��viateur 1	139,18	307,4	20532,84	1973,54	9,77	23,39	0,94%
D��viateur2	206,20	0,0	22936,44	807,12	10,66	25,54	1,02%
Appui 3	172,93	93,1	44675,42	-21221,14	14,93	37,73	1,51%
D��viateur 1	139,18	302,6	20580,62	3541,96	10,07	24,11	0,96%
D��viateur2	209,41	0,0	22904,35	5909,53	11,56	27,68	1,11%
Appui 4	174,56	75,0	45005,36	-16487,79	14,46	36,56	1,46%
D��viateur 1	139,18	345,7	20149,62	-3658,5	8,59	20,57	0,82%
D��viateur2	187,31	0,0	23125,29	0	10,61	25,40	1,02%
Appui 5	163,37	151,0	43709,45	-9014,89	13,22	33,43	1,34%
D��viateur 1	139,18	345,7	20149,62	2709	9,72	23,29	0,93%
D��viateur2	187,31	0,0	23125,29	4244,05	11,36	27,21	1,09%
Appui 6	163,37	151,0	43709,45	-5968,71	12,86	32,52	1,30%
D��viateur 1	139,18	345,7	20149,62	85,85	9,26	22,17	0,89%
D��viateur2	187,31	0,0	23125,29	-9735,42	8,87	21,25	0,85%
Appui 7	163,37	153,4	43660,58	-25626,34	15,16	38,33	1,53%
D��viateur 1	139,18	280,2	20804,50	10160,42	11,35	27,18	1,09%
D��viateur2	228,56	0,0	22712,76	4720,48	11,26	26,96	1,08%
Appui 8	184,30	40,5	45500,46	-36551,05	16,96	42,87	1,71%
D��viateur 1	139,18	280,2	20804,50	2697,97	10,02	24,00	0,96%
D��viateur2	228,56	0,0	22712,76	4182,57	11,16	26,73	1,07%
Appui 9	184,30	40,5	45500,46	-33623,82	16,61	42,00	1,68%
D��viateur 1	139,18	280,2	20804,50	4697,54	10,38	24,85	0,99%
D��viateur2	228,56	0,0	22712,76	4311,8	11,18	26,78	1,07%
Appui 10	184,30	40,5	45500,46	-34408,01	16,71	42,23	1,69%
D��viateur 1	139,18	280,2	20804,50	4161,73	10,28	24,62	0,99%
D��viateur2	228,56	0,0	22712,76	4287,75	11,18	26,77	1,07%
Appui 11	184,30	40,5	45500,46	-34198,49	16,68	42,17	1,69%
D��viateur 1	139,18	280,2	20804,50	4305,41	10,31	24,69	0,99%
D��viateur2	228,56	0,0	22712,76	4299,75	11,18	26,78	1,07%
Appui 12	184,30	40,5	45500,46	-34252,38	16,69	42,19	1,69%
D��viateur 1	139,18	280,2	20804,50	4266,5	10,30	24,67	0,99%
D��viateur2	228,56	0,0	22712,76	4290,81	11,18	26,78	1,07%

Appui 13	184,30	40,5	45500,46	-34246,32	16,69	42,18	1,69%
Déviateur 1	139,18	280,2	20804,50	4278,46	10,30	24,67	0,99%
Déviateur2	228,56	0,0	22712,76	4314,57	11,18	26,79	1,07%
Appui 14	184,30	40,5	45500,46	-34216,67	16,68	42,18	1,69%
Déviateur 1	139,18	280,2	20804,50	4269,53	10,30	24,67	0,99%
Déviateur2	228,56	0,0	22712,76	4228,49	11,17	26,75	1,07%
Appui 15	184,30	40,5	45500,46	-34341,35	16,70	42,21	1,69%
Déviateur 1	139,18	280,2	20804,50	4293,26	10,31	24,68	0,99%
Déviateur2	228,56	0,0	22712,76	4549,04	11,23	26,89	1,08%
Appui 16	184,30	40,5	45500,46	-33872,27	16,64	42,07	1,68%
Déviateur 1	139,18	280,2	20804,50	4207,28	10,29	24,64	0,99%
Déviateur2	228,56	0,0	22712,76	3352,93	11,01	26,38	1,06%
Appui 17	184,30	42,2	45467,68	-35623,9	16,84	42,57	1,70%
Déviateur 1	139,18	275,7	20850,00	6006,33	10,63	25,46	1,02%
Déviateur2	233,56	0,0	22662,85	3188,77	10,96	26,25	1,05%
Appui 18	186,85	30,5	45650,54	-41259,03	17,55	44,37	1,78%
Déviateur 1	139,18	275,7	20850,00	4874,39	10,43	24,98	1,00%
Déviateur2	233,56	0,0	22662,85	11063,22	12,36	29,61	1,18%
Appui 19	186,85	13,5	45990,39	-28881,38	16,19	40,94	1,64%
Déviateur 1	139,18	327,2	20334,68	-8949,5	7,73	18,52	0,74%
Déviateur2	195,16	0,0	23046,80	2332,83	10,98	26,31	1,05%
Appui 20	167,34	124,0	44170,18	-8723,43	13,32	33,66	1,35%
Déviateur 1	139,18	327,2	20334,68	4437,07	10,12	24,23	0,97%
Déviateur2	195,16	0,0	23046,80	973,28	10,74	25,73	1,03%
Appui 21	167,34	124,0	44170,18	-15651,01	14,13	35,72	1,43%
Déviateur 1	139,18	327,2	20334,68	1129,48	9,53	22,82	0,91%
Déviateur2	195,16	0,0	23046,80	4905,66	11,44	27,40	1,10%
Appui 22	167,34	124,0	44170,18	-8098,64	13,24	33,48	1,34%
Déviateur 1	139,18	327,2	20334,68	973,28	9,50	22,75	0,91%
Déviateur2	195,16	0,0	23046,80	-10667,66	8,67	20,76	0,83%
Appui 23	167,34	80,8	45034,06	-31380,52	16,22	41,01	1,64%

Annexe C.4. Les pertes instantanées

Section	ΔF_{Frot}	ΔF_{anc}	$\Delta F_{\text{non-simu}}$	$\Delta F_{\text{instantanées}}$
Culée 1	139,18	342,1	28,40	20,39%
Déviateur 1	139,18	232,3	26,46	15,92%
Déviateur2	188,70	51,4	24,14	10,57%
Appui 1	164,07	137,2	36,16	13,50%
Déviateur 1	139,18	307,4	24,05	18,83%
Déviateur2	206,20	0,0	26,42	9,31%
Appui 2	172,93	92,2	37,05	12,09%
Déviateur 1	139,18	307,4	23,39	18,80%
Déviateur2	206,20	0,0	25,54	9,27%
Appui 3	172,93	93,1	37,73	12,15%
Déviateur 1	139,18	302,6	24,11	18,64%
Déviateur2	209,41	0,0	27,68	9,48%
Appui 4	174,56	75,0	36,56	11,45%
Déviateur 1	139,18	345,7	20,57	20,22%
Déviateur2	187,31	0,0	25,40	8,51%
Appui 5	163,37	151,0	33,43	13,91%
Déviateur 1	139,18	345,7	23,29	20,33%
Déviateur2	187,31	0,0	27,21	8,58%
Appui 6	163,37	151,0	32,52	13,88%
Déviateur 1	139,18	345,7	22,17	20,28%
Déviateur2	187,31	0,0	21,25	8,34%
Appui 7	163,37	153,4	38,33	14,21%
Déviateur 1	139,18	280,2	27,18	17,86%
Déviateur2	228,56	0,0	26,96	10,22%
Appui 8	184,30	40,5	42,87	10,71%
Déviateur 1	139,18	280,2	24,00	17,74%
Déviateur2	228,56	0,0	26,73	10,21%
Appui 9	184,30	40,5	42,00	10,67%
Déviateur 1	139,18	280,2	24,85	17,77%
Déviateur2	228,56	0,0	26,78	10,21%
Appui 10	184,30	40,5	42,23	10,68%
Déviateur 1	139,18	280,2	24,62	17,76%
Déviateur2	228,56	0,0	26,77	10,21%
Appui 11	184,30	40,5	42,17	10,68%
Déviateur 1	139,18	280,2	24,69	17,76%
Déviateur2	228,56	0,0	26,78	10,21%
Appui 12	184,30	40,5	42,19	10,68%
Déviateur 1	139,18	280,2	24,67	17,76%
Déviateur2	228,56	0,0	26,78	10,21%

Appui 13	184,30	40,5	42,18	10,68%
Déviateur 1	139,18	280,2	24,67	17,76%
Déviateur2	228,56	0,0	26,79	10,21%
Appui 14	184,30	40,5	42,18	10,68%
Déviateur 1	139,18	280,2	24,67	17,76%
Déviateur2	228,56	0,0	26,75	10,21%
Appui 15	184,30	40,5	42,21	10,68%
Déviateur 1	139,18	280,2	24,68	17,76%
Déviateur2	228,56	0,0	26,89	10,22%
Appui 16	184,30	40,5	42,07	10,68%
Déviateur 1	139,18	280,2	24,64	17,76%
Déviateur2	228,56	0,0	26,38	10,20%
Appui 17	184,30	42,2	42,57	10,76%
Déviateur 1	139,18	275,7	25,46	17,61%
Déviateur2	233,56	0,0	26,25	10,39%
Appui 18	186,85	30,5	44,37	10,47%
Déviateur 1	139,18	275,7	24,98	17,59%
Déviateur2	233,56	0,0	29,61	10,53%
Appui 19	186,85	13,5	40,94	9,65%
Déviateur 1	139,18	327,2	18,52	19,40%
Déviateur2	195,16	0,0	26,31	8,86%
Appui 20	167,34	124,0	33,66	13,00%
Déviateur 1	139,18	327,2	24,23	19,63%
Déviateur2	195,16	0,0	25,73	8,84%
Appui 21	167,34	124,0	35,72	13,08%
Déviateur 1	139,18	327,2	22,82	19,57%
Déviateur2	195,16	0,0	27,40	8,90%
Appui 22	167,34	124,0	33,48	12,99%
Déviateur 1	139,18	327,2	22,75	19,57%
Déviateur2	195,16	0,0	20,76	8,64%
Appui 23	167,34	80,8	41,01	11,57%

Annexe C.5. Pertes dues au fluage du béton

Section	ΔF_{inst}	P	M	σ_b	ΔF_{fluage}	$\Delta F_{flu} / P_0$
Culée 1	20,39%	49894,87	0	13,88	110,10	4,40%
Déviateur1	15,92%	24958,61	7477,81	12,78	101,32	4,05%
Déviateur2	10,57%	24971,98	-2222,71	11,06	87,67	3,51%
Appui 1	13,50%	49929,32	-25008,25	16,83	133,48	5,34%
Déviateur 1	18,83%	24951,34	-1445,26	11,19	88,70	3,55%
Déviateur2	9,31%	24975,14	-865,37	11,30	89,60	3,58%
Appui 2	12,09%	49936,37	-26862,87	17,05	135,23	5,41%
Déviateur 1	18,80%	24951,41	-7378,12	10,13	80,32	3,21%
Déviateur2	9,27%	24975,23	-2026,62	11,09	87,96	3,52%
Appui 3	12,15%	49936,04	-30154,68	17,44	138,30	5,53%
Déviateur 1	18,64%	24951,81	-1692,08	11,14	88,35	3,53%
Déviateur2	9,48%	24974,69	2517,19	11,90	94,38	3,78%
Appui 4	11,45%	49939,57	-23415,38	16,65	132,02	5,28%
Déviateur 1	20,22%	24947,86	-7972,77	10,02	79,47	3,18%
Déviateur2	8,51%	24977,13	-1602,58	11,17	88,57	3,54%
Appui 5	13,91%	49927,24	-12806,78	15,40	122,11	4,88%
Déviateur 1	20,33%	24947,58	1368,01	11,68	92,65	3,71%
Déviateur2	8,58%	24976,95	1434,98	11,71	92,86	3,71%
Appui 6	13,88%	49927,42	-10722,97	15,15	120,16	4,81%
Déviateur 1	20,28%	24947,70	-3722,97	10,78	85,47	3,42%
Déviateur2	8,34%	24977,54	-17460,91	8,35	66,18	2,65%
Appui 7	14,21%	49925,77	-36379,26	18,17	144,08	5,76%
Déviateur 1	17,86%	24953,74	7170,09	12,72	100,87	4,04%
Déviateur2	10,22%	24972,85	6724,16	12,65	100,31	4,01%
Appui 8	10,71%	49943,26	-51939,53	20,00	158,62	6,35%
Déviateur 1	17,74%	24954,06	3857,14	12,13	96,19	3,85%
Déviateur2	10,21%	24972,87	2210,64	11,85	93,94	3,76%
Appui 9	10,67%	49943,44	-47793,16	19,52	154,75	6,19%
Déviateur 1	17,77%	24953,98	6698,66	12,64	100,20	4,01%
Déviateur2	10,21%	24972,87	6140,92	12,55	99,49	3,98%
Appui 10	10,68%	49943,39	-48855,2	19,64	155,74	6,23%
Déviateur 1	17,76%	24954,00	5919,34	12,50	99,10	3,96%
Déviateur2	10,21%	24972,87	6081,6	12,54	99,40	3,98%
Appui 11	10,68%	49943,40	-48628,34	19,61	155,53	6,22%
Déviateur 1	17,76%	24953,99	6158,34	12,54	99,44	3,98%
Déviateur2	10,21%	24972,87	6115,26	12,54	99,45	3,98%
Appui 12	10,68%	49943,40	-48693,05	19,62	155,59	6,22%
Déviateur 1	17,76%	24953,99	6108,71	12,53	99,37	3,98%
Déviateur2	10,21%	24972,87	2321,42	11,87	94,09	3,76%
Appui 13	10,68%	49943,40	-41515	18,78	148,90	5,96%

Déviateur 1	17,76%	24953,99	6077,94	12,53	99,33	3,97%
Déviateur2	10,21%	24972,87	6147,8	12,55	99,50	3,98%
Appui 14	10,68%	49943,40	-48633,12	19,62	155,54	6,22%
Déviateur 1	17,76%	24953,99	6112,26	12,53	99,38	3,98%
Déviateur2	10,21%	24972,87	5979,48	12,52	99,26	3,97%
Appui 15	10,68%	49943,39	-48773,51	19,63	155,67	6,23%
Déviateur 1	17,76%	24953,99	6128,26	12,54	99,40	3,98%
Déviateur2	10,22%	24972,86	2664,88	11,93	94,58	3,78%
Appui 16	10,68%	49943,42	-41025,11	18,72	148,45	5,94%
Déviateur 1	17,76%	24954,00	5981	12,51	99,19	3,97%
Déviateur2	10,20%	24972,91	4726	12,29	97,49	3,90%
Appui 17	10,76%	49942,99	-50623,2	19,85	157,39	6,30%
Déviateur 1	17,61%	24954,37	8572,92	12,97	102,85	4,11%
Déviateur2	10,39%	24972,42	4526,07	12,26	97,20	3,89%
Appui 18	10,47%	49944,46	-58617,17	20,79	164,85	6,59%
Déviateur 1	17,59%	24954,42	6960,49	12,68	100,58	4,02%
Déviateur2	10,53%	24972,08	2962,68	11,98	94,99	3,80%
Appui 19	9,65%	49948,55	-43554,65	19,02	150,81	6,03%
Déviateur 1	19,40%	24949,91	-12749,18	9,17	72,73	2,91%
Déviateur2	8,86%	24976,25	1604,85	11,74	93,09	3,72%
Appui 20	13,00%	49931,80	-12382,28	15,35	121,72	4,87%
Déviateur 1	19,63%	24949,34	6316,27	12,57	99,65	3,99%
Déviateur2	8,84%	24976,31	1384,55	11,70	92,78	3,71%
Appui 21	13,08%	49931,39	-22245,63	16,51	130,91	5,24%
Déviateur 1	19,57%	24949,48	1603,98	11,73	92,99	3,72%
Déviateur2	8,90%	24976,14	2379,98	11,88	94,19	3,77%
Appui 22	12,99%	49931,84	-11505,51	15,25	120,90	4,84%
Déviateur 1	19,57%	24949,49	1383,59	11,69	92,68	3,71%
Déviateur2	8,64%	24976,81	-15166,93	8,75	69,41	2,78%
Appui 23	11,57%	49938,97	-44607,2	19,14	151,77	6,07%

Annexe C.6.Pertes dues à la relaxation des aciers

Section	X(m)	ΔF_{inst}	σ_b	ΔF_{rel}	$\Delta F_{rel} / P_0$
Culée 1	0,00	20,39%	1484,97	137,85	5,51%
Déviateur 1	6,63	15,92%	1485,63	138,04	5,52%
Déviateur2	19,88	10,57%	1486,43	138,28	5,53%
Appui 1	26,50	13,50%	1485,99	138,15	5,53%
Déviateur 1	35,50	18,83%	1485,20	137,92	5,52%
Déviateur2	53,50	9,31%	1486,62	138,33	5,53%
Appui 2	62,50	12,09%	1486,20	138,21	5,53%
Déviateur 1	71,50	18,80%	1485,20	137,92	5,52%
Déviateur2	89,50	9,27%	1486,62	138,33	5,53%
Appui 3	98,50	12,15%	1486,19	138,21	5,53%
Déviateur 1	107,94	18,64%	1485,23	137,92	5,52%
Déviateur2	126,81	9,48%	1486,59	138,33	5,53%
Appui 4	136,25	11,45%	1486,30	138,24	5,53%
Déviateur 1	142,69	20,22%	1484,99	137,86	5,51%
Déviateur2	155,56	8,51%	1486,73	138,37	5,54%
Appui 5	162,00	13,91%	1485,93	138,13	5,53%
Déviateur 1	168,44	20,33%	1484,98	137,85	5,51%
Déviateur2	181,31	8,58%	1486,72	138,36	5,53%
Appui 6	187,75	13,88%	1485,94	138,13	5,53%
Déviateur 1	194,19	20,28%	1484,98	137,85	5,51%
Déviateur2	207,06	8,34%	1486,76	138,38	5,54%
Appui 7	213,50	14,21%	1485,89	138,12	5,53%
Déviateur 1	225,56	17,86%	1485,34	137,96	5,52%
Déviateur2	249,69	10,22%	1486,48	138,29	5,53%
Appui 8	261,75	10,71%	1486,41	138,27	5,53%
Déviateur 1	273,81	17,74%	1485,36	137,96	5,52%
Déviateur2	297,94	10,21%	1486,48	138,29	5,53%
Appui 9	310,00	10,67%	1486,41	138,27	5,53%
Déviateur 1	322,06	17,77%	1485,36	137,96	5,52%
Déviateur2	346,19	10,21%	1486,48	138,29	5,53%
Appui 10	358,25	10,68%	1486,41	138,27	5,53%
Déviateur 1	370,31	17,76%	1485,36	137,96	5,52%
Déviateur2	394,44	10,21%	1486,48	138,29	5,53%
Appui 11	406,50	10,68%	1486,41	138,27	5,53%
Déviateur 1	418,56	17,76%	1485,36	137,96	5,52%
Déviateur2	442,69	10,21%	1486,48	138,29	5,53%
Appui 12	454,75	10,68%	1486,41	138,27	5,53%
Déviateur 1	466,81	17,76%	1485,36	137,96	5,52%
Déviateur2	490,94	10,21%	1486,48	138,29	5,53%
Appui 13	503,00	10,68%	1486,41	138,27	5,53%

Déviateur 1	515,06	17,76%	1485,36	137,96	5,52%
Déviateur2	539,19	10,21%	1486,48	138,29	5,53%
Appui 14	551,25	10,68%	1486,41	138,27	5,53%
Déviateur 1	563,31	17,76%	1485,36	137,96	5,52%
Déviateur2	587,44	10,21%	1486,48	138,29	5,53%
Appui 15	599,50	10,68%	1486,41	138,27	5,53%
Déviateur 1	611,56	17,76%	1485,36	137,96	5,52%
Déviateur2	635,69	10,22%	1486,48	138,29	5,53%
Appui 16	647,75	10,68%	1486,41	138,27	5,53%
Déviateur 1	659,81	17,76%	1485,36	137,96	5,52%
Déviateur2	683,94	10,20%	1486,48	138,29	5,53%
Appui 17	696,00	10,76%	1486,40	138,27	5,53%
Déviateur 1	708,75	17,61%	1485,38	137,97	5,52%
Déviateur2	734,25	10,39%	1486,45	138,29	5,53%
Appui 18	747,00	10,47%	1486,44	138,28	5,53%
Déviateur 1	759,75	17,59%	1485,38	137,97	5,52%
Déviateur2	785,25	10,53%	1486,43	138,28	5,53%
Appui 19	798,00	9,65%	1486,56	138,32	5,53%
Déviateur 1	805,50	19,40%	1485,11	137,89	5,52%
Déviateur2	820,50	8,86%	1486,68	138,35	5,53%
Appui 20	828,00	13,00%	1486,07	138,17	5,53%
Déviateur 1	835,50	19,63%	1485,08	137,88	5,52%
Déviateur2	850,50	8,84%	1486,69	138,35	5,53%
Appui 21	858,00	13,08%	1486,05	138,17	5,53%
Déviateur 1	865,50	19,57%	1485,09	137,88	5,52%
Déviateur2	880,50	8,90%	1486,68	138,35	5,53%
Appui 22	888,00	12,99%	1486,07	138,17	5,53%
Déviateur 1	895,50	19,57%	1485,09	137,88	5,52%
Déviateur2	910,50	8,64%	1486,71	138,36	5,53%
Appui 23	918,00	11,57%	1486,28	138,23	5,53%

Annexe C.7.Pertes totales des câbles de poussage

Section	ΔF_{frot}	ΔF_{anc}	$\Delta F_{\text{non-sim}}$	ΔF_{ret}	ΔF_{flu}	$\frac{5}{6} \Delta F_{\text{rel}}$	ΔF_{Tot}
Culée 1	139,18	342,08	28,40	28,5	114,87	107,29	30,41%
Déviateur 1	139,18	232,26	26,46	28,5	115,04	98,39	25,59%
Déviateur2	188,70	51,37	24,14	28,5	115,23	86,31	19,77%
Appui 1	164,07	137,18	36,16	28,5	115,12	123,35	24,18%
Déviateur 1	139,18	307,38	24,05	28,5	114,93	93,27	28,29%
Déviateur2	206,20	0	26,42	28,5	115,28	92,47	18,76%
Appui 2	172,93	92,18	37,05	28,5	115,18	124,54	22,82%
Déviateur 1	139,18	307,38	23,39	28,5	114,93	91,14	28,18%
Déviateur2	206,20	0	25,54	28,5	115,28	89,62	18,61%
Appui 3	172,93	93,14	37,73	28,5	115,17	126,66	22,97%
Déviateur 1	139,18	302,60	24,11	28,5	114,94	93,30	28,11%
Déviateur2	209,41	0	27,68	28,5	115,27	96,64	19,10%
Appui 4	174,56	75,01	36,56	28,5	115,20	122,36	22,09%
Déviateur 1	139,18	345,70	20,57	28,5	114,88	83,38	29,29%
Déviateur2	187,31	0	25,40	28,5	115,31	88,52	17,80%
Appui 5	163,37	151,00	33,43	28,5	115,11	115,55	24,28%
Déviateur 1	139,18	345,70	23,29	28,5	114,88	92,14	29,75%
Déviateur2	187,31	0	27,21	28,5	115,30	94,36	18,11%
Appui 6	163,37	151,00	32,52	28,5	115,11	112,78	24,13%
Déviateur 1	139,18	345,70	22,17	28,5	114,88	88,53	29,56%
Déviateur2	187,31	0	21,25	28,5	115,31	75,12	17,10%
Appui 7	163,37	153,44	38,33	28,5	115,10	130,64	25,18%
Déviateur 1	139,18	280,21	27,18	28,5	114,97	102,42	27,70%
Déviateur2	228,56	0	26,96	28,5	115,24	95,00	19,77%
Appui 8	184,30	40,51	42,87	28,5	115,23	140,60	22,08%
Déviateur 1	139,18	280,21	24,00	28,5	114,97	92,15	27,16%
Déviateur2	228,56	0	26,73	28,5	115,24	94,26	19,73%
Appui 9	184,30	40,51	42,00	28,5	115,23	137,94	21,94%
Déviateur 1	139,18	280,21	24,85	28,5	114,97	94,90	27,31%
Déviateur2	228,56	0	26,78	28,5	115,24	94,43	19,74%
Appui 10	184,30	40,51	42,23	28,5	115,23	138,65	21,98%
Déviateur 1	139,18	280,21	24,62	28,5	114,97	94,16	27,27%
Déviateur2	228,56	0	26,77	28,5	115,24	94,40	19,74%
Appui 11	184,30	40,51	42,17	28,5	115,23	138,46	21,97%
Déviateur 1	139,18	280,21	24,69	28,5	114,97	94,36	27,28%
Déviateur2	228,56	0	26,78	28,5	115,24	94,42	19,74%
Appui 12	184,30	40,51	42,19	28,5	115,23	138,51	21,97%
Déviateur 1	139,18	280,21	24,67	28,5	114,97	94,31	27,28%
Déviateur2	228,56	0	26,78	28,5	115,24	94,41	19,74%
Appui 13	184,30	40,51	42,18	28,5	115,23	138,51	21,97%

Déviateur 1	139,18	280,21	24,67	28,5	114,97	94,32	27,28%
Déviateur2	228,56	0	26,79	28,5	115,24	94,44	19,74%
Appui 14	184,30	40,51	42,18	28,5	115,23	138,48	21,97%
Déviateur 1	139,18	280,21	24,67	28,5	114,97	94,31	27,28%
Déviateur2	228,56	0	26,75	28,5	115,24	94,32	19,74%
Appui 15	184,30	40,51	42,21	28,5	115,23	138,59	21,98%
Déviateur 1	139,18	280,21	24,68	28,5	114,97	94,34	27,28%
Déviateur2	228,56	0	26,89	28,5	115,24	94,76	19,76%
Appui 16	184,30	40,51	42,07	28,5	115,23	138,17	21,95%
Déviateur 1	139,18	280,21	24,64	28,5	114,97	94,22	27,27%
Déviateur2	228,56	0	26,38	28,5	115,25	93,12	19,67%
Appui 17	184,30	42,15	42,57	28,5	115,22	139,76	22,10%
Déviateur 1	139,18	275,66	25,46	28,5	114,97	96,70	27,22%
Déviateur2	233,56	0	26,25	28,5	115,24	92,89	19,86%
Appui 18	186,85	30,46	44,37	28,5	115,24	144,88	22,01%
Déviateur 1	139,18	275,66	24,98	28,5	114,98	95,14	27,14%
Déviateur2	233,56	0	29,61	28,5	115,23	103,72	20,43%
Appui 19	186,85	13,47	40,94	28,5	115,26	133,64	20,75%
Déviateur 1	139,18	327,19	18,52	28,5	114,91	76,11	28,18%
Déviateur2	195,16	0	26,31	28,5	115,29	91,72	18,28%
Appui 20	167,34	123,99	33,66	28,5	115,14	115,29	23,36%
Déviateur 1	139,18	327,19	24,23	28,5	114,90	94,52	29,14%
Déviateur2	195,16	0	25,73	28,5	115,29	89,85	18,18%
Appui 21	167,34	123,99	35,72	28,5	115,14	121,59	23,69%
Déviateur 1	139,18	327,19	22,82	28,5	114,90	89,97	28,90%
Déviateur2	195,16	0	27,40	28,5	115,29	95,26	18,47%
Appui 22	167,34	123,99	33,48	28,5	115,14	114,73	23,33%
Déviateur 1	139,18	327,19	22,75	28,5	114,90	89,76	28,89%
Déviateur2	195,16	0	20,76	28,5	115,30	73,84	17,34%
Appui 23	167,34	80,80	41,01	28,5	115,20	135,89	22,75%

Annexe D

Annexe D.1. Calcul de ferrailage de l'hourdis supérieur

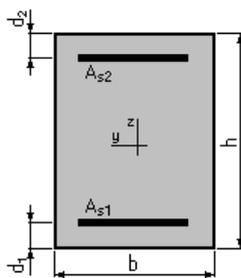
1. Hypothèses

Béton : $f_{c28} = 40,0$ (MPa)

Acier : $f_e = 500,0$ (MPa)

- Fissuration très préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99

2. Section



$$b = 100,0 \text{ (cm)}$$

$$h = 32,5 \text{ (cm)}$$

$$d_1 = 4,0 \text{ (cm)}$$

$$d_2 = 4,0 \text{ (cm)}$$

3. Moments appliqués

	M_{\max} (kN*m)	M_{\min} (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	86,82	-203,30
Etat Limite de Service	60,86	-142,46
Etat Limite Ultime (Accidentel)	0,00	0,00

4. Résultats

Sections d'Acier :

Section théorique	$A_{s1} = 15,5$ (cm ²)	Section théorique	$A_{s2} = 35,44$ (cm ²)
Section minimum	$A_{s \min} = 3,59$ (cm ²)		
Théorique	$\rho = 1,45$ (%)		
Minimum	$\rho_{\min} = 0,14$ (%)		

Analyse par Cas :

Cas ELU	$M_{\max} = 86,82$	(kN*m)	$M_{\min} = -203,30$	(kN*m)
Coefficient de sécurité:	1,62		Pivot: A	
Position de l'axe neutre:	$y = 5,9$	(cm)		
Bras de levier:	$Z = 26,1$	(cm)		
Déformation du béton:	$\epsilon_b = 2,62$	(‰)		
Déformation de l'acier:	$\epsilon_s = 10,00$	(‰)		

Contrainte de l'acier :

tendue : $\sigma_s = 434,8$ (MPa)

comprimée : $\sigma_s' = 170,3$ (MPa)

Cas ELS $M_{\max} = 60,86$ (kN*m) $M_{\min} = -142,46$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1,00

Position de l'axe neutre: $y = 11,2$ (cm)

Bras de levier: $Z = 24,8$ (cm)

Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 8,5$ (MPa)

Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24,0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:

Tendue : $\sigma_s = 196,3$ (MPa)

Comprimée : $\sigma_s' = 82,3$ (MPa)

Contrainte limite de l'acier :

$\sigma_{s \text{ lim}} = 200,0$ (MPa)

Annexe D.2. Calcul de ferrailage des âmes

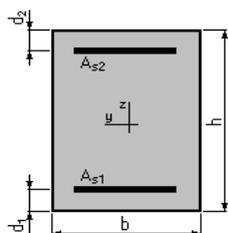
1. Hypothèses

Béton: fc28 = 40,0 (MPa)

Acier: fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration très préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul en poutre
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section



$b = 100,0$ (cm)

$h = 32,5$ (cm)

$d_1 = 4,0$ (cm)

$d_2 = 4,0$ (cm)

3. Efforts appliqués

Cas N ^o	Type	N (kN)	M (kN*m)
1.	ELU	401,71	140,00
2.	ELS	284,90	93,13

4. Résultats

Sections d'Acier:

Section théorique	$A_{s1} = 12.44 \text{ (cm}^2\text{)}$	Section théorique	$A_{s2} = 0,0 \text{ (cm}^2\text{)}$
Section minimum	$A_{s \text{ min}} = 6.35 \text{ (cm}^2\text{)}$		
théorique	$\rho = 0,42 \text{ (\%)}$		
minimum	$\rho_{\text{min}} = 0,14 \text{ (\%)}$		

Analyse par Cas:

Cas N°1: TypeELU $N = 401,71 \text{ (kN)}$ $M = 140,00 \text{ (kN*m)}$

Coefficient de sécurité:	1,58	Pivot: A
Position de l'axe neutre:	$y = 6,4 \text{ (cm)}$	
Bras de levier:	$Z = 26,0 \text{ (cm)}$	
Déformation de l'acier:	$\epsilon_s = 10,00 \text{ (\%)}_0$	
Déformation du béton:	$\epsilon_b = 2,87 \text{ (\%)}_0$	
Contrainte de l'acier:		

tendue: $\sigma_s = 434,8 \text{ (MPa)}$

Cas N° 2: TypeELS $N = 284,90 \text{ (kN)}$ $M = 93,13 \text{ (kN*m)}$

Coefficient de sécurité:	1,00
Position de l'axe neutre:	$y = 11,6 \text{ (cm)}$
Bras de levier:	$Z = 24,6 \text{ (cm)}$
Contrainte maxi du béton:	$\sigma_b = 9,0 \text{ (MPa)}$
Contrainte limite:	$0,6 f_{cj} = 24,0 \text{ (MPa)}$

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 197,2 \text{ (MPa)}$

Contrainte limite de l'acier: $\sigma_{s \text{ lim}} = 197,2 \text{ (MPa)}$