

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département Génie civil



Mémoire de projet de fin d'études

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

Etude du pont poussé Ain Nâadja – Baraki de 1500 ml, avec
deux rayons de courbure de direction opposée et un tronçon de
clavage de 150 m

CHEKIRED Mohamed Rayan & FERHAT Riad

Présenté et soutenu publiquement le (07/07/2025)

Composition du jury :

Président :	Dr. A. TADJADIT	MCB (ENP)
Examineur	M. M. BOUZOUALEGH	MAA (ENP)
Encadreurs :	Dr. H. MOHABEDDINE	MCA (ENP)
	Dr. D. CHERID	MCA (ENP)
Invité :	Mr. R.C. MAHGOUN	

ENP 2025

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département Génie civil



Mémoire de projet de fin d'études

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

Etude du pont poussé Ain Nâadja – Baraki de 1500 ml, avec
deux rayons de courbure de direction opposée et un tronçon de
clavage de 150 m

CHEKIRED Mohamed Rayan & FERHAT Riad

Présenté et soutenu publiquement le (07/07/2025)

Composition du jury :

Président :	Dr. A. TADJADIT	MCB (ENP)
Examineur	M. M. BOUZOUALEGH	MAA (ENP)
Encadreurs :	Dr. H. MOHABEDDINE	MCA (ENP)
	Dr. D. CHERID	MCA (ENP)
Invité :	Mr. R.C. MAHGOUN	

ENP 2025

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à nos encadrateurs Dr. H. MOHABEDDINE et Dr. D. CHERID pour leur encadrement rigoureux, leur disponibilité et leurs conseils précieux tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements à Dr. A. TADJADIT, président du jury, et à M. M. BOUZOUALEGH, examinateur, pour l'intérêt porté à ce mémoire et pour leurs remarques constructives.

Nos remerciements vont également à l'École Nationale Polytechnique d'Alger et à tous les enseignants du Département de Génie Civil, qui nous ont offert un cadre de formation et les moyens nécessaires pour mener à bien ce projet dans les meilleures conditions.

Au-delà de cela, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à MAHGOUN Chafik pour son temps et son aide précieuse depuis la Roumanie, ainsi qu'à BOUROUIBA Abderrahmane pour avoir su nous assister avec disponibilité et bienveillance en période de crise.

Dédicaces

Remercier Dieu tout puissant.

À mes parents, pour votre amour, vos sacrifices et votre présence à chaque étape. Votre soutien m'a permis d'aller jusqu'au bout.

À ma sœur, mon frère, ma grand-mère, mes tantes et mes oncles, qui m'ont épaulé en tout temps, qui était toujours là pour moi et soutenue durant cette période de préparation

A tous mes amis sans exception

À mon binôme et à sa famille

Et enfin, à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail : je ne vous oublie pas. Merci du fond du cœur.

Chekired Mohamed Rayan

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents,
Pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inébranlable tout
au long de mon parcours.

À ma sœur Ines et à mon frère Mehdi,
Pour leur présence, leurs encouragements et leur bienveillance de
tous les instants.

À mon binôme Rayan Chekired,
Pour sa collaboration, sa persévérance et l'esprit d'équipe qui a
rendu cette aventure enrichissante.

À mes amis Rayan Djebrouni, Rayane Salmi, Othmane, Islam,
Pour leurs moments de partage, leur amitié sincère et leur bonne
humeur, qui m'ont aidé à surmonter les difficultés.

Et enfin, Rym,
Pour son inspiration, son soutien précieux et sa lumière dans les
moments sombres.

À vous tous, j'adresse toute ma gratitude et mon affection.
Ce travail est le reflet de votre présence à mes côtés.

Ferhat Riad

ملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة وتصميم جسر علوي للسكك الحديدية بطول 1464 متر يربط بين عين نعجة و براقى ضمن مشروع توسعة مترو الجزائر. تم تنفيذ هذا المنشأ باستخدام طريقة الدفع التدريجي، ويتكون من 35 فتحة مدعومة على 34 عمود، مع عتب صندوق أحادي مسبق الإجهاد. شملت الدراسة تقدير الأحمال، وحساب الإجهادات في مراحل الدفع والخدمة، بالإضافة إلى التحليل الزلزالي وتصميم العناصر الإنشائية وفقاً لمعايير RPOA 2008. تم إجراء المحاكاة باستخدام برامج MIDAS Civil و CSI Bridge بهدف تحسين أمان المنشأ واستدامته.

الكلمات المفتاحية

الدفع التدريجي، جسر سكك حديدية، الإجهاد المسبق، الدراسة الزلزالية، الجسور الصندوقية

Abstract

This work focuses on the study and design of a 1464-meter railway viaduct connecting Ain Nâadja to Baraki as part of the Algiers Metro extension. Constructed using the incremental launching method, the structure consists of 35 spans supported by 34 piers, with a prestressed single-box girder deck. The study covered load estimation, calculation of stresses during the launching and service phases, as well as seismic analysis and the design of structural elements in accordance with RPOA 2008 standards. Simulations were performed using MIDAS Civil and CSI Bridge to optimize the safety and durability of the structure.

Keywords

Incremental launching, railway bridge, prestressing, seismic analysis, box girders.

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception puis l'étude d'un viaduc ferroviaire de 1464 m reliant Ain Nâadja à Baraki, dans le cadre de l'extension du métro d'Alger. Réalisé par poussage, l'ouvrage comprend 35 travées supportées par 34 piles, avec un tablier en mono-caisson précontraint. L'étude a traité l'estimation des charges, le calcul des sollicitations en phases de poussage et de service, ainsi que l'analyse sismique et le dimensionnement des éléments porteurs conforme au RPOA 2008. Les simulations ont été réalisées sur MIDAS Civil et CSI Bridge pour optimiser la sécurité et la durabilité de l'ouvrage.

Mots clés :

Poussage, pont ferroviaire, précontrainte, étude sismique, caissons.

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

TABLE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION 18

CHAPITRE I. PRESENTATION DU PROJET ET PREDIMENSIONNEMENT 20

I.1 INTRODUCTION : 21

I.2 PRESENTATION DE L'OUVRAGE : 21

I.3 LES DONNEES FONCTIONNELLES : 22

I.3.1 Tracé en plan : 22

I.3.2 Profil en long : 23

I.3.3 Profil en travers : 24

I.4 LES DONNEES GEOTECHNIQUES : 25

I.4.1 Classification du site : 25

I.5 PRINCIPES DU POUSSAGE : 26

I.5.1 Les types de ponts poussés : 26

I.6 ELEMENTS DE STRUCTURE 28

I.6.1 La superstructure: 28

I.6.2 L'infrastructure : 29

I.6.2.1 Les piles 29

I.6.3 Les culées : 32

I.6.4 Les appareils d'appuis : 33

I.7 PROCESSUS CONSTRUCTIF 34

I.7.1 Détails du processus de poussage (exemple du tronçon 1 – C1 à P23) : 35

I.7.2 Construction du tronçon coulé sur place : 35

I.7.3 Manœuvre de poussage : 37

I.8 MATERIAUX 38

I.8.1 Béton : 38

I.8.2 Acier : 38

I.8.3 Caractéristiques de l'acier des câbles de la précontrainte : 38

I.9 PREDIMENSIONNEMENT DE LA SECTION TRANSVERSALE : 39

I.9.1 Conception de la section transversale : 39

I.9.1.1 Choix du type de tablier : 39

I.9.1.2 Choix du type de caisson : 40

I.9.1.3 Épaisseur du Hourdis Supérieur : 40

I.9.1.4 Épaisseur des âmes : 41

I.9.1.5 Hauteur du voussoir : 41

I.9.1.6 Longueur d'encorbellement : 41

I.9.1.7 Hourdis inférieur : 42

I.9.1.8 Largeur de la base : 42

CHAPITRE II. ESTIMATION DES CHARGES ET SURCHARGES ET CALCUL DES SOLlicitATIONS 43

II.1 INTRODUCTION 44

II.2 CALCUL DES CHARGES ET SURCHARGES..... 44

II.2.1 Charges permanentes 44

II.2.1.1 Poids propre des éléments structuraux : 44

II.2.1.2 Poids propre des éléments non structuraux : 44

II.2.2 Actions variables 45

II.2.2.1 Actions dues au trafic ferroviaire	45
II.2.2.1.1 Modèle de charges 71.....	45
II.2.2.1.2 Schémas de charges SW/0	46
II.2.2.1.3 Transmission des charges :	46
II.2.2.2 Charge générale pour les pistes de service non accessibles au public :	47
II.2.2.3 Effets dynamiques	47
II.2.2.4 Forces horizontales.....	48
II.2.2.4.1 Forces centrifuges	48
II.2.2.4.2 Effort de lacet	49
II.2.2.4.3 Actions dues aux efforts de traction et de freinage :	49
II.2.2.4.4 Actions dues aux variations de température	49
II.2.2.4.5 Actions dues au vent.....	51
II.2.3 Actions accidentelles :	52
II.2.4 Combinaisons de charges :	52
II.2.4.1 Combinaisons de charges en cours de poussage :.....	52
II.2.4.2 Combinaisons de charges en service :	52
II.2.4.2.1 Définition des actions de circulation ferroviaire groupe de charge :	52
II.2.4.2.2 Combinaisons d'actions et les coefficients partiels appropriés	53
II.3 CALCUL DES SOLLICITATIONS :	55
II.3.1 Phase de poussage :.....	55
II.3.1.1 Modélisation.....	55
II.3.1.2 Poussage 1 (tronçons 1) :.....	55
II.3.1.3 Poussage 2 (tronçons 3) :	56
II.3.1.4 Sollicitations dues au poids propre du tablier :	57
II.3.1.5 Poussage du tronçon 3 :	59
II.3.1.5.1 Les phases de poussage :	59
II.3.1.5.2 Poussage du tronçon 1 :	65
II.3.1.6 Moments dus aux Gradient thermique :	66
II.3.2 Calcul des sollicitations en phase de service :	67
II.3.2.1 Modélisation.....	67
II.3.2.2 Résultats de calculs.....	69
II.3.2.2.1 Moments de flexion :	69
II.3.2.2.2 Effort tranchant :	70
II.4 CONCLUSION :	71
CHAPITRE III. ETUDE DE LA PRECONTRAINTE.....	72
III.1 INTRODUCTION	73
III.2 CONCEPTION DU CABLAGE DE PRECONTRAINTE.....	73
III.2.1 Précontrainte de poussage :	73
III.2.1.1 Câblage rectiligne	74
III.2.1.2 Détermination du tracé des câbles (7):	74
III.2.1.3 Calcul du nombre de câbles :	75
III.2.1.3.1 Tronçons 1 :.....	76
III.2.1.3.2 Tronçons 3 :.....	79
III.2.1.4 Vérification des contraintes en phase de poussage (8) :	81
III.2.2 Précontrainte de Service (continuité) :	84
III.2.2.1 Détermination du tracé des câbles :	85
III.2.2.2 Calcul du nombre de câbles :	86
III.2.2.2.1 Les tronçons 1 et 3 :	86
III.2.2.2.2 Tronçon 2	87
III.2.2.3 Vérification des contraintes en phase de service	88
III.2.2.4 Répartition de la précontrainte de continuité :	90
III.3 CALCULES DES PERTES DE PRECONTRAINTES :	91
III.3.1 Calcul des pertes pour la précontrainte de continuité	91

III.3.1.1 Calcul des pertes instantanées	91
III.3.1.1.1 Pertes par frottement (8) :	91
III.3.1.1.2 Pertes par recul d'ancrage (8) :	93
III.3.1.1.3 Perte par déformations instantanées du béton (8):	95
III.3.1.1.4 Récapitulatifs des pertes instantanées :	97
III.3.1.2 Pertes de tension différées :	98
III.3.1.2.1 Pertes dues au retrait du Béton (7):	98
III.3.1.2.2 Pertes dues au fluage du béton (7) :	99
III.3.1.2.3 Pertes dues à la Relaxation des aciers (8) :	103
III.3.1.2.4 Les pertes totales des câbles extérieurs (8)	105
III.3.2 Calcul des pertes pour la précontraintes de poussage :	106
III.3.2.1 Calcul des pertes instantanées	106
III.3.2.1.1 Pertes dues au frottement :	106
III.3.2.1.2 Pertes dues au recul d'ancrage	107
III.3.2.1.3 Perte par déformations instantanées du béton :	108
III.3.2.1.4 Récapitulatifs des pertes instantanées :	110
III.3.2.2 Pertes de tension différées :	110
III.3.2.2.1 Pertes dues au retrait du Béton	110
III.3.2.2.2 Pertes dues au fluage du béton	111
III.3.2.2.3 Pertes dues à la Relaxation des aciers :	113
III.3.2.3 Les pertes totales des câbles de poussage	114
III.4 VERIFICATION DE L'EFFORT TRANCHANT (8)	114
III.4.1 Calcul des contraintes de cisaillement limite :	115
III.4.1.1 Calcul des contraintes de cisaillements aux états limites de service :	116
III.4.1.2 Calcul des contraintes de cisaillements aux états limite ultime :	116
III.4.2 Détermination de l'inclinaison des bielles :	117
III.4.3 Détermination des armatures transversales :	117
III.4.3.1 Justification du béton :	118
III.4.3.2 Vérification à la torsion	118
III.5 CONCLUSION :	119
CHAPITRE IV. FERRAILLAGE DE LA SECTION TRANSVERSALE	120
IV.1 INTRODUCTION :	121
IV.2 CALCUL DES SOLlicitATIONS	121
IV.2.1 Charges dues au Traffic :	123
IV.2.2 Combinaison de charges	124
IV.2.3 Les résultats obtenus :	124
IV.3 CALCUL DU FERRAILLAGE :	128
IV.3.1 Ferrailage des hourdis et de porte-à-faux	129
IV.3.1.1 La distribution d'armature :	129
IV.3.2 Ferrailage des âmes :	129
IV.3.2.1 La distribution d'armature :	129
IV.4 CONCLUSION :	130
CHAPITRE V. ETUDE DE LA PILE	131
V.1 INTRODUCTION :	132
V.2 CONCEPTION DE LA PILE :	132
V.2.1 Piles à sections pleines :	132
V.2.1.1 Vérification des piles au flambement :	132
V.2.1.2 Etude sismique :	133
V.2.1.2.1 Méthode d'analyse	133
V.2.1.2.2 Méthode du spectre de réponse :	133
V.2.1.2.3 Le spectre de dimensionnement :	133

V.2.1.2.4 Le spectre de réponse vertical (6):.....	135
V.2.1.2.5 Les périodes propres.....	135
V.2.1.2.6 Combinaison des composantes de l'action sismique :.....	135
V.2.1.2.7 Evaluations des efforts à la base des piles :	136
V.2.1.2.8 Coefficient réducteur des efforts.....	136
V.2.1.2.9 Dimensionnement en capacité des piles pour les efforts transversaux et longitudinaux :	136
V.2.1.3 Ferrailage dans la zone critique.....	137
V.2.1.3.1 Tableau récapitulatif des efforts les plus défavorables.	139
V.2.1.3.2 Calcul du ferrailage des piles :.....	140
V.2.1.3.3 Armature Transversale :	142
V.2.2 Piles à section creuse :.....	143
V.2.2.1 Conception des piles :	143
V.2.2.2 Vérification de la stabilité de la pile vis-à-vis du flambement :	143
V.2.2.3 Calcul du ferrailage section rectangulaire :	144
V.2.2.4 Calcul de ferrailage :	147
V.2.2.4.1 Application Numérique :.....	147
V.2.2.4.2 Armature Transversale :	147
V.2.2.5 Calcul du ferrailage section circulaire :.....	148
V.3 COMPARAISON PILES A SECTION PLEINE ET CREUSE :	149
V.3.1 EVALUATION DES RESULTATS :.....	153
V.4 CONCLUSION :.....	155
CONCLUSION GENERAL	156
BIBLIOGRAPHIE	158
ANNEXE.....	159

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Classification des sols présents sur le site	26
Tableau I.2: caractéristiques des piles	30
Tableau II.1: Poids propres des éléments par mètre	45
Tableau II.2: Longueur déterminante (5)	48
Tableau II.3: Valeurs caractéristiques des gradients linéaires de température (12)	50
Tableau II.4: Coefficients k_{sur} pour différentes épaisseurs de revêtement (12).....	51
Tableau II.5: Groups de charges (5)	53
Tableau II.6: Les longueurs des voussoirs du tronçon 1.....	56
Tableau II.7: Les longueurs des voussoirs du tronçon 2.....	57
Tableau II.8: Les sollicitations maximales de la phase 1	59
Tableau II.9: Les sollicitations maximales de la phase 2	59
Tableau II.10: Les sollicitations maximales de la phase 3	60
Tableau II.11: Les sollicitations maximales de la phase 4	60
Tableau II.12: Les sollicitations maximales de la phase 5	60
Tableau II.13: Les sollicitations maximales de la phase 6	61
Tableau II.14: Les sollicitations maximales de la phase 7	61
Tableau II.15: Les sollicitations maximales de la phase 8	61
Tableau II.16: Les sollicitations maximales de la phase 9	62
Tableau II.17: Les sollicitations maximales de la phase 10	62
Tableau II.18: Les sollicitations maximales de la phase 11	62
Tableau II.19: Les sollicitations maximales de la phase 12	63
Tableau II.20: Les sollicitations maximales de la phase 13	63
Tableau II.21: Les sollicitations maximales de la phase 14	63
Tableau II.22: Les sollicitations maximales de la phase 15	64
Tableau II.23: Les sollicitations maximales de la phase 16	64
Tableau II.24: Les sollicitations maximales de la phase 15	64
Tableau II.25: récapitulatif des sollicitations maximales sur le poussage du tronçon 3	65
Tableau II.26: Les sollicitations maximales des phases de poussage du tronçons 1.....	65
Tableau III.1: Calcul du nombre de câbles supérieur nécessaire en cours du poussage1.....	77
Tableau III.2: Calcul du nombre de câbles inférieure nécessaire en cours du poussage1	78
Tableau III.3: Calcul du nombre de câbles supérieur nécessaire en cours du poussage2.....	79
Tableau III.4: Calcul du nombre de câbles inférieure nécessaire en cours du poussage2	80
Tableau III.6: Vérifications des contraintes supérieures et inférieures sur les appuis et en travées, lors des phases de poussage du tronçon 3.....	84
Tableau III.7: Calcul du nombre de câbles de continuité pour les tronçons poussés (1 et 3).....	87
Tableau III.8: Calcul du nombre de câbles de continuité pour les tronçons 2	88
Tableau III.9: Vérification des contraintes Supérieures et inférieures en phase de service pour les tronçons poussés.....	89
Tableau III.10: Vérification des contraintes Supérieures et inférieures en phase de service pour le tronçon de transition.....	90
Tableau III.11: les pertes dues au frottement pour la précontrainte de continuité	92
Tableau III.12: les pertes dues au recul d'ancrage pour la précontrainte de continuité	94
Tableau III.13: les pertes dues au non-simultanéité des mises en tension pour la précontrainte de continuité .	96
Tableau III.14: les pertes instantanées pour la précontrainte de service du tronçons 3	97

Tableau III.15: les pertes dues au fluage du béton de 14 à 28 jours pour la précontrainte de continuité	100
Tableau III.16: les pertes dues au fluage du béton de 28 à ∞ jours pour la précontrainte de continuité.....	102
Tableau III.17: les pertes dues à la relaxation des aciers pour la précontrainte de continuité	104
Tableau III.18: les pertes totales pour la précontrainte de continuité	105
Tableau III.19: les pertes dues au frottement pour la précontrainte de poussage du tronçon 3	107
Tableau III.20: les pertes dues au recul d'ancrage pour la précontrainte de poussage du tronçons 3	108
Tableau III.21 : les pertes dues au non-simultanéité des mises en tension pour la précontrainte de poussage du tronçons 3	109
Tableau III.22: les pertes instantanées pour la précontrainte de poussage du tronçons 3	110
Tableau III.23: les pertes dues au fluage du béton de 14 à 28 jours pour la précontrainte de poussage du tronçons 3	111
Tableau III.24: les pertes dues au fluage du béton de 28 à ∞ jours pour la précontrainte de poussage du tronçons 3	112
Tableau III.25: les pertes dues à la relaxation des aciers pour la précontrainte de poussage du tronçons 3.....	113
Tableau III.26: les pertes totales pour la précontrainte de poussage du tronçons 3.....	114
Tableau III.27: Calculs des contraintes de cisaillement aux états limites de service	116
Tableau III.28: Calculs des contraintes de cisaillement aux états limites de service	117
Tableau IV.1: Longueur déterminante pour l'étude transversale (4)	123
Tableau IV.2: combinaisons de charges	124
Tableau IV.3: Sollicitations en flexion simple	128
Tableau IV.4: Sollicitations en flexion composée.....	128
Tableau IV.5: Section des aciers passifs pour les hourdis et le porte-à-faux	129
Tableau IV.6: Récapitulatif sur les sections des aciers passifs des hourdis et de porte-à-faux.....	129
Tableau IV.7: Section des aciers passifs pour les âmes	129
Tableau IV.8: Récapitulatif sur les sections des aciers passifs des âmes	130
Tableau V.1: valeurs des périodes caractéristiques et le coefficient selon le site	134
Tableau V.2:caréristique des piles et facteur réducteurs des efforts	139
Tableau V.3 récapitulatif des efforts les plus défavorables.	140
Tableau V.4 section d'acier et nombre de barres	141
Tableau V.5 récapitulatif des efforts les plus défavorables des section creuses	146
Tableau V.6 estimatif du cout des PP et PC	152

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Tracé en plan du tronçons 1.....	22
Figure I.2 Tracé en plan du tronçons 2.....	22
Figure I.3 : Tracé en plan du tronçons 3.....	23
Figure I.4: Profil en long 1	23
Figure I.5: Profil en long 2	23
Figure I.6: Profil en long 3	24
Figure I.7: Profil en long 4	24
Figure I.8: Profil en travers.....	25
Figure I.9: Principe de pont poussé des deux cotés	27
Figure I.10 : Principe de pont poussé d'un seul cotés.....	28
Figure I.11: Section transversale du voussoir.....	29
Figure I.12: Profil en plan et en travers de la pile Type 1.....	31
Figure I.13: Profil en plan et en travers de la pile Type 2.....	31
Figure I.14: Profil en plan et en travers de la pile Type 3.....	32
Figure I.15: Section longitudinale de la culée 1	33
Figure I.16: Section longitudinale de la culée 2	33
Figure I.17: Appareil d'Appui de type (SIP)	34
Figure I.18: Schéma de construction du tronçon coulé sur place	36
Figure I.19: Schémas des différent phase de poussage (2).....	37
Figure I.20: Profil transversal adopté.....	39
Figure I.21: section transversale du mono-caisson simple à deux âmes	40
Figure I.22: Section transversale du caisson	42
Figure II.1 : Modèle de charges 71 et valeurs caractéristiques pour les charges verticales	45
Figure II.2: Modèle de charges SW/0 et valeurs caractéristiques pour les charges verticales	46
Figure II.3: Répartition de la charge longitudinalement	46
Figure II.4: Répartition de la charge transversalement.....	47
Figure II.5: Variation du moment maximal sur appui (1)	58
Figure II.6: Variation du moment maximal en travée (1).....	58
Figure II.7: Schéma statique de la phase 1.....	59
Figure II.8: Schéma de la phase 2.....	59
Figure II.9: Schéma de la phase 3.....	60
Figure II.10: Schéma de la phase 4.....	60
Figure II.11: Schéma de la phase 5.....	60
Figure II.12: Schéma de la phase 6.....	61
Figure II.13 : Schéma de la phase 7.....	61
Figure II.14: Schéma de la phase 8.....	61
Figure II.15: Schéma de la phase 9.....	62
Figure II.16: Schéma de la phase 10.....	62
Figure II.17 : Schéma de la phase 11.....	62
Figure II.18: Schéma de la phase 12.....	63
Figure II.19: Schéma de la phase 13.....	63
Figure II.20: Schéma de la phase 14.....	63
Figure II.21: Schéma de la phase 15.....	64
Figure II.22: Schéma de la phase 1.....	64

Figure II.23: Schéma de la phase 15	64
Figure II.24: Vue en 3D de l'ouvrage sur le logiciel CSI Bridge	68
Figure II.25: Diagramme du moment fléchissant sous charges permanentes	69
Figure II.26: Diagramme du moment fléchissant sous combinaison E.L.U défavorable	69
Figure II.27: Diagramme du moment fléchissant sous combinaison E.L.S défavorable	70
Figure II.28: Diagrammes des efforts tranchants sous charges permanente	70
Figure II.29: Diagramme des efforts tranchant sous combinaison E.L.U défavorable	71
Figure II.30: Diagramme des efforts tranchant sous combinaison E.L.S défavorable	71
Figure III.1: Tracé d'un câble en élévation	74
Figure III.2 : disposition des câbles de précontraintes de poussages pour les tronçons 1 et 3 sur la section du caisson	81
Figure III.3: Tracé des câbles	85
Figure III.4: Effet du glissement de l'ancrage	93
Figure IV.1: Caisson modélisé sur Midas civil (vue 2D)	122
Figure IV.2: Caisson modélisé sur Midas civil (vue 3D)	122
Figure IV.3Modèle de charge UIC 71 avec la majoration des efforts	123
Figure IV.4: Répartition de la charge longitudinalement	124
Figure IV.5: Moment fléchissant a l'ELU	125
Figure IV.6: Moment fléchissant a l'ELS	125
Figure IV.7: Effort tranchant a l'ELU	126
Figure IV.8: Effort tranchant a l'ELS	126
Figure IV.9: Effort normal a l'ELU	127
Figure IV.10: Effort normal a l'ELS	127
Figure V.1: spectre de dimensionnement horizontales $\xi = 5\%$	134
Figure V.2spectre de dimensionnement verticale $\xi = 5\%$	135
Figure V.3 formation de rotule plastique sur les piles	138
Figure V.4 : ferrailage de la pile pleine rectangulaire	142
Figure V.5 : ferrailage de la pile pleine circulaire	143
Figure V.6 Abaques de WALTHER section creuse rectangulaire (10)	147
Figure V.7Abaques de WALTHER section creuse circulaire	148
Figure V.8 : ferrailage de la pile creuse rectangulaire	149
Figure V.9 : ferrailage de la pile creuse circulaire	149

TABLE DES ABREVIATIONS

A : aire de la section

AQS : Charge des accotements et quais solidaires

A_p : section d'armatures de précontrainte de tous les câbles

A_s : Section des aciers

A_{sup} : section d'acier de la nappe supérieure

A_{inf} : section d'acier de la nappe inférieure

A_t : somme des aires de section droite des aciers d'un cours d'armatures transversales

B : largeur du voussoir

E : Module d'élasticité de l'acier

E' : Effet globale sismique

E_{ij} : Module de Young instantané à l'âge de j jours

E_p : Module de Young des torons de précontrainte

E_x, E_y, E_z : Effets sismiques selon les axes X, Y, Z

E% : pourcentage d'économie

e_s : l'excentricité du câble supérieure par rapport au centre de gravité

e_i : l'excentricité du câble inférieure par rapport au centre de gravité

F : Force ou action, en général

H_{long} : Force sismique longitudinale

H_{trans} : Force sismique transversale

G : Action permanente

G_{max}, G_{min} : Parties défavorable / favorable du poids propre

h, b, e : Dimensions géométriques (hauteur, base, épaisseur)

HA : Haute adhérence

H_{rh} : Force horizontale due au retrait et au fluage

I : Moment d'inertie de la section

M_{dx}, M_{dy} : Moments réduits de capacité

M_{max} : Moments maximaux

M_g : Moment dû au poids propre

M_t : Moment dû au gradient thermique

M_x, M_y : Moments fléchissant selon les axes

M_u : Moment fléchissant de calcul ultime

M_{ser} : Moment fléchissant de calcul de service

N : Effort normal

N_{ser} : Effort normal de calcul de service

N_u : Effort normal de calcul ultime

P : le périmètre de la section

P_v : Poids propre du voussoir
 P_k : Action caractéristique de précontrainte
 P_u : précontrainte de dimensionnement
 P_0 : Force initiale de précontrainte.
 Q : Action d'exploitation
 Q_1 : actions de base
 Q_{k1} : Charge variable principale (modèle UIC 71)
 Q_{lak}, Q_{lbk} : Efforts de traction et de freinage
 Q_{sk} : Effort de lacet
 $Q_{vk}; q_{vk}$: Valeurs caractéristiques des charges verticales spécifiées pour les schémas de
 $Q_{tk}; q_{tk}$: Valeurs caractéristiques des forces centrifuges
 S : Coefficient de site sismique
 S_t : Espacement des armatures
 V : Vitesse d'exploitation de référence
 V_{red} : effort tranchant réduit
 V_u : Effort tranchant de calcul ultime
 v : la distance du centre de gravité de la section transversale
 v' : la distance du centre de gravité de la section à la fibre inférieure
 W : Résultante des actions du vent
 W_1, W_0 : Actions de vent (avec / sans circulation)
 d : Hauteur utile de la section en flexion simple
 f : Coefficient de frottement câble-gaine
 f_{cd90} : Résistance du béton à 90 jours (compression)
 f_{bu} : Résistance utile du béton
 f_{cj} : Résistance caractéristique à la compression du béton (j jours)
 f_e : Limite d'élasticité de l'acier
 f_{pe} : Contrainte de précontrainte élastique garantie
 f_{pr} : Contrainte de rupture garantie
 f_{tj} : Résistance caractéristique à la traction du béton (j jours)
 f_y : Moment de résistance élastique de la section brute
 g : Gravité 9,81 m/s² ou
 g' : recul d'ancrage (~6 mm)
 h : Hauteur d'une poutre
 k_{sur} : Coefficient surfacique
 l_f : Longueur de flambement
 m_x, m_y, n : Efforts relatifs (abaques Walther)
 n : Coefficient d'équivalence acier-béton
 p : Charge permanente unitaire

q : Facteur réducteur
 r : Rayon de courbure
 v : Effort normal réduit concomitant
 Δ : Variation
 ΔP : Perte de tension
 ΔT : Gradient thermique linéaire
 $\sum \psi_{0i} Q_{ki}$: Somme pondérée des charges variables
 Ω : l'aire délimitée par la ligne moyenne
 α : Coefficient de dilatation thermique du béton
 β : Facteur de réduction (fluage, flambement, etc.)
 γ_b : Coefficient partiel de sécurité sur le béton
 γ_s : Coefficient partiel de sécurité sur l'acier
 η : Rapport des moments relatifs m_x/m_y
 k : Coefficient de flambement
 λ : Longueur d'influence du recul d'ancrage
 λ_h : Longueur de zone critique $\lambda \cdot h$
 ξ : Amortissement (ex. 5 %)
 ρ : Masse volumique du béton
 σ_{bc} : Contrainte de compression admissible
 σ_{p0} : Contrainte initiale de précontrainte
 σ_{inf} : Contrainte dans la fibre inférieure la plus éloignée du C.G.
 σ_{sup} : Contrainte dans la fibre supérieure la plus éloignée du C.G.
 $\Delta\sigma_{pi}$: contrainte des pertes instantanées
 $\Delta\sigma_{frot}$: pertes dues au frottement
 $\Delta\sigma_{enc}$: pertes dues au recul d'ancrage
 $\Delta\sigma_{racc}$: pertes dues au non-simultanéité des mises en tension
 $\Delta\sigma_{ret}$: Pertes dues au retrait du Béton
 $\Delta\sigma_{flu}$: pertes dues au fluage
 $\Delta\sigma_{rel}$: pertes dues à la relaxation des aciers
 $\Delta\sigma_{pd}$: contrainte des pertes différées
 τ : Contrainte de cisaillement
 τ_T : contrainte tangentielle due au moment de torsion.
 τ_V : contrainte tangentielle due à l'effort tranchant.
 τ_{red} : contrainte tangentielle τ_{red}
 τ_{lim} : contrainte admissible de cisaillement.
 ϕ_2, ϕ_3 : Coefficients dynamiques ferroviaires
 $\psi / \psi_{21} / \psi_{0i}$: Facteurs de combinaison des charges variables
 ω : coefficient abaque de Walther

INTRODUCTION

Introduction

Le projet de fin d'études représente l'aboutissement de la formation d'ingénieur et constitue une étape essentielle pour mettre en pratique les connaissances et compétences acquises tout au long des cinq années d'études. Ce projet, au cœur de notre parcours académique, nous permet d'aborder des problématiques réelles et concrètes, tout en étant en phase avec les exigences du domaine professionnel. Le choix du sujet de ce projet est donc fondamental, car il doit non seulement s'inscrire dans notre domaine de spécialisation mais aussi nous initier aux défis complexes de la conception et du dimensionnement des ouvrages d'art.

Dans ce contexte, nous avons choisi de nous intéresser à la conception et à l'étude d'un pont ferroviaire. En effet, la construction d'ouvrages d'art, tels que les ponts, revêt une importance particulière dans le développement des infrastructures, notamment ferroviaires, afin de répondre aux besoins croissants d'un pays en pleine expansion. Ces réalisations témoignent de l'importance de ces structures tant sur le plan technique que socio-économique. Un pont, dans son essence, est un ouvrage permettant à une voie de circulation (qu'elle soit routière ou ferroviaire) de franchir un obstacle naturel (comme un cours d'eau) ou une autre voie de communication, qu'elle soit terrestre, fluviale ou maritime.

Le dimensionnement d'un pont repose sur une approche complexe qui englobe des domaines variés, tels que la statique, la dynamique, la résistance des matériaux L'aspect particulier du calcul des ponts réside dans l'interaction entre les différents éléments structurels qui sont simultanément soumis à diverses sollicitations. Cette complexité nécessite une conception soignée et l'optimisation de plusieurs paramètres, tels que l'économie du projet, la sécurité des usagers, l'esthétique de la structure et le respect des délais de réalisation, tout en prenant en compte les contraintes naturelles et fonctionnelles du site.

Le viaduc qui relie Ain Nâadja et Baraki représente l'extension C de la ligne 1 du Metro d'Alger se situant entre les PK 1+789.000 et 3+253.000 en se démarquant par une longueur de 1464m, qui a pour but d'élargir les possibilités aux citoyens d'Alger ainsi que la réduction du trafic routier.

Le présent travail de fin d'études est structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'ouvrage, incluant son tracé, ses différents éléments constitutifs, les matériaux employés ainsi que le prédimensionnement de la section transversale.

Le deuxième chapitre aborde l'estimation des charges permanentes et des surcharges appliquées à la structure avec le calcul des sollicitations intervenant durant la phase de poussage à l'aide du logiciel MIDAS Civil. Par la suite, la détermination des sollicitations en phase de service réalisées à l'aide du logiciel CSI Bridge.

Le chapitre trois concerne l'étude de la précontrainte de poussage et de continuité où on aborde le calcul du nombre des câbles nécessaires, leurs emplacements et leur tracé, ainsi que la vérification des contraintes et le calcul des pertes de précontrainte.

Le chapitre quatre est dédié à l'étude de la section transversale, dont nous déterminons la quantité des armatures passives nécessaires.

Le cinquième chapitre est réservé à la conception et du dimensionnement des piles, avec vérification au flambement, analyse sismique et proposition d'une alternative économique.

Nous achèverons notre travail par une conclusion générale qui fera le point sur toutes connaissances et compétences que nous avons accumulées durant ce périple.

CHAPITRE

I

PRESENTATION DU PROJET ET PREDIMENSIONNEMENT

I.1 Introduction :

L'objet de ce projet est l'étude du Viaduc ferroviaire Hyperstatique reliant Ain-Nâadja - Baraki qui a pour but d'étendre le métro d'Alger sur la capitale.

I.2 Présentation de l'ouvrage :

Sur une longueur totale de 1464m allant de Ain-Nâadja à Baraki se présente l'extension du métro d'Alger qui vise à ouvrir de nouveaux horizons et à offrir possibilités aux citoyens algérois, tout en contribuant à la réduction du trafic routier.

Le Viaduc qui fait l'objet de notre étude se situe entre les PK 1+789.000 et 3+253.000, longeant ainsi 1464.00 m passant par la ligne Ferroviaire SNTF, la Route Nationale N38 et l'Oued EL Harrach.

- il comporte 34 piles et 2 culées formant ainsi 35 travées réparties sur trois tronçons :

- **Tronçon 1** : Entre la culée C-1 et la pile P-23 le tracé du viaduc est constitué par une courbe en plan avec 1500.00m de rayon et une longueur de 929.5m, avec une pente longitudinale de 0.0% (sauf dans le premier tronçon qui coïncide avec un accord vertical). Deux stations aériennes sont disposées sur celui-ci.
- **Tronçon 2** : Le tronçon compris entre la pile P-23 et la pile P-27, d'une longueur de 147,6 m, est considéré comme un tronçon transitoire coulé in situ, en raison de l'impossibilité de recourir à la méthode de poussage. Cette contrainte est liée aux caractéristiques géométriques du tracé en plan, qui comporte une clothoïde, une droite, puis une seconde clothoïde. En profil longitudinal, le tracé présente deux raccordements verticaux ainsi qu'un tronçon à pente constante.
- **Tronçon 3** : il s'agit du dernier tronçon du viaduc se situant entre la pile P-27 et la culée C-2 longeant ainsi 388.95m, constitué par une courbe en plan de 1195.00m et une pente longitudinale constante de 4%.

Deux stations élevées seront envisagées :

- Station Ain Naadja Gare située entre les Pk 1+884.5 (pile73) et PK 2+002.5 (pile-7).
- Station Future Parc Urbain situé entre les PK 2+587.0 (pile-19) et PK 2+707.7(pile-23).

Concernant la méthode de réalisation, plusieurs options s'offrent à nous pour la construction d'un pont de cette envergure. La méthode de l'encorbellement successif constitue un choix souvent envisageable. Cependant, dans le cas présent, des contraintes liées à l'organisation du chantier ont conduit les concepteurs à privilégier la méthode de poussage, qui s'est révélée la plus adaptée pour pallier cette problématique.

I.3 Les données fonctionnelles :

I.3.1 Tracé en plan :

Le tracé en plan de notre ouvrage se divise en 3 tronçons distinctes :

-Tronçons 1 :

Une courbe concave de rayon 1500.0m de 929.5m de longueur



Figure I.1 Tracé en plan du tronçons 1

- **Tronçons 2 :** Tronçons de transition avec un tracé qui se compose de deux clothoïdes aux extrémités et une droite au milieu d'une longueur totale de 147.6m.



Figure I.2 Tracé en plan du tronçons 2

- Tronçons 3 :

Une courbe convexe de rayon 1195.0m de 388.95m de longueur.

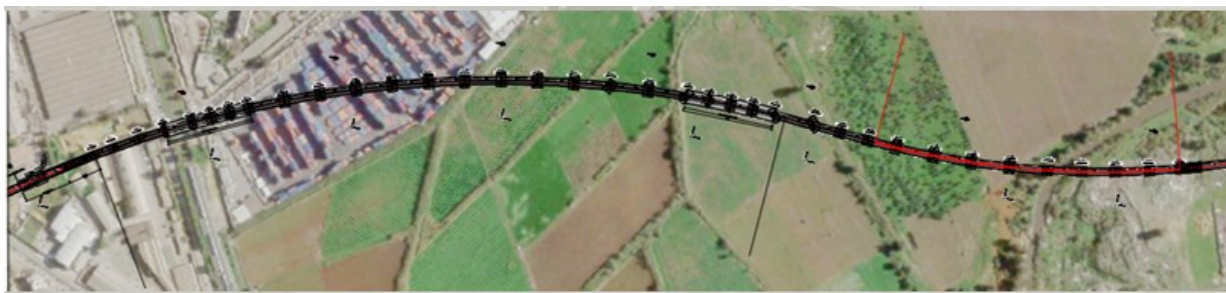


Figure I.3 : Tracé en plan du tronçons 3

I.3.2 Profil en long :

Le profil en long présente une variation dès l'entrée du viaduc, et ce, jusqu'à la deuxième travée, en raison des contraintes topographiques et des exigences du tracé.

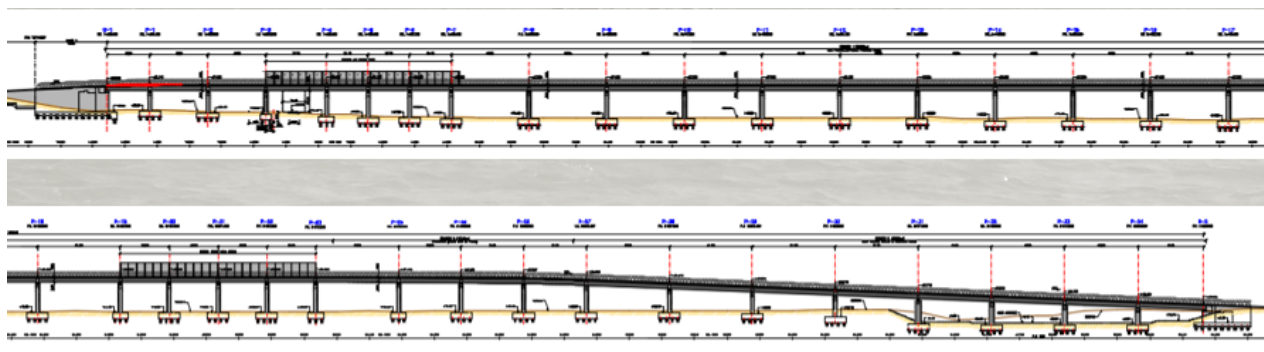


Figure I.4: Profil en long 1

- Profil en long horizontal avec une pente 0.00% entre la travée 2 et la travée 24

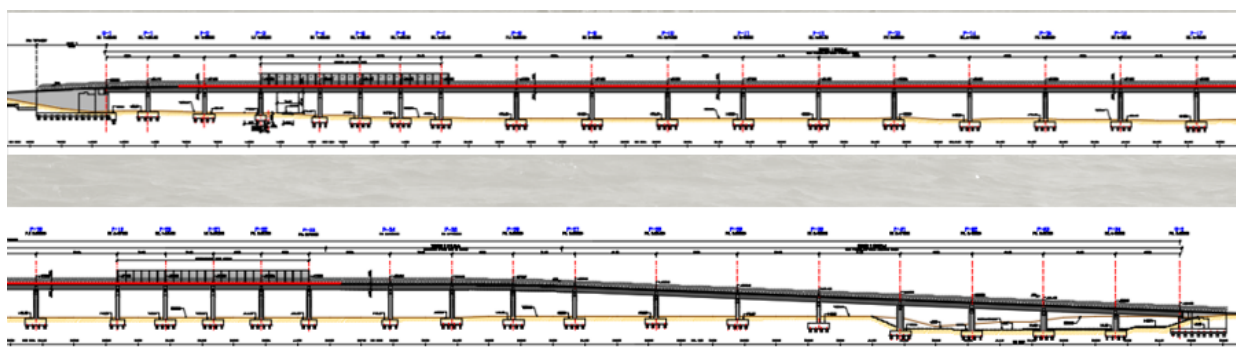


Figure I.5: Profil en long 2

- Accord allant de la pente nulle (0.00%) pour atteindre une pente de -4.00% entre la travée 24 et la travée 27

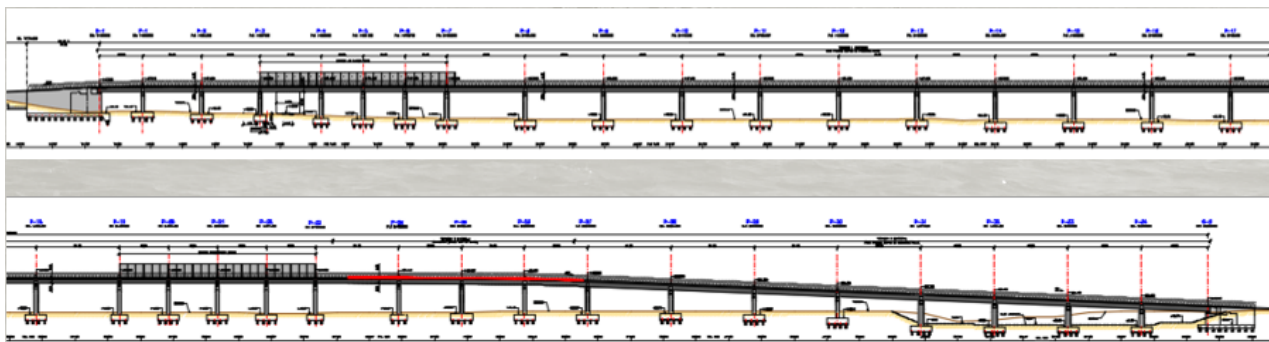


Figure I.6: Profil en long 3

- Profil en long avec une pente constante de -4.00% jusqu'à la fin du viaduc.

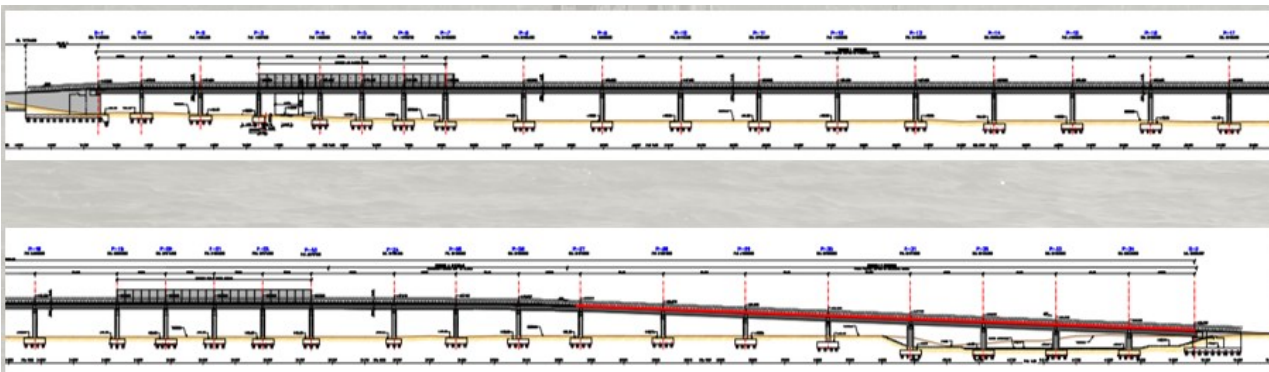
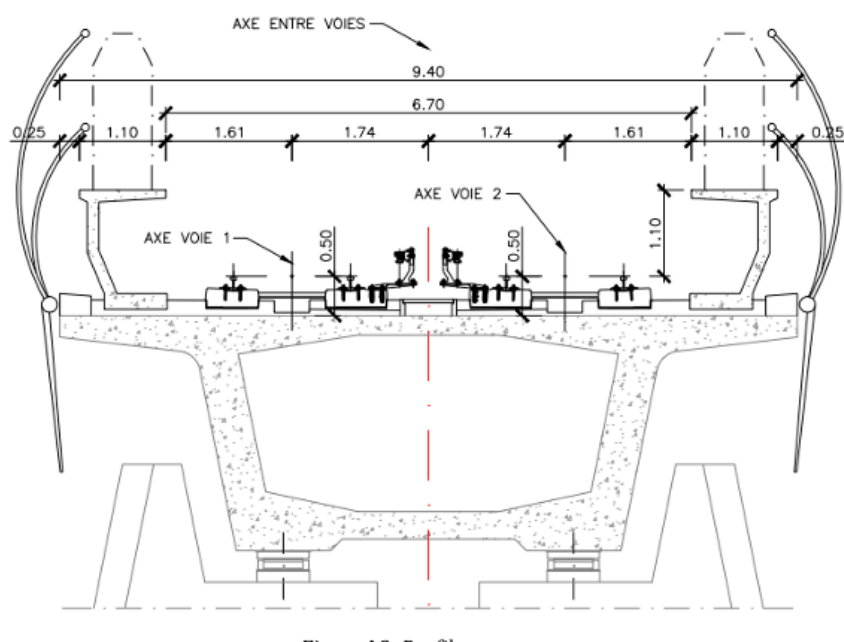


Figure I.7: Profil en long 4

I.3.3 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 1.1m, 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.



I.4 Les données géotechniques :

La reconnaissance géotechnique se traduit par l'exécution de plusieurs essais in situ ainsi que par des analyses en laboratoire, consistant à caractériser les propriétés physiques et mécaniques des sols et des roches rencontrées. Qui consiste à effectuer :

- Des sondages carottés
- Des sondages pressiométriques
- Essais en laboratoire

I.4.1 Classification du site :

Selon RPOA et les résultats des études géotechniques les sols présents sur le site sont classés comme suit :

Tableau I.1: 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

Avec

- S1 : site rocheux.
- S2 : site ferme.
- S3 : site meuble.
- S4 : site très meuble.

I.5 Principes du poussage :

La méthode du poussage consiste à couler le tablier du pont à proximité immédiate de l'ouvrage, généralement sur une aire de préfabrication située dans le prolongement de l'axe longitudinal du tablier, en arrière de la culée. Une fois le tronçon prêt, le tablier est translaté progressivement vers sa position finale, en le faisant glisser sur ses appuis définitifs, à l'aide de dispositifs de poussage (vérins ou chariots de translation).

I.5.1 Les types de ponts poussés :

- Ponts poussés bilatéralement :

Ce type de pont est généralement réservé aux ouvrages de petite à moyenne portée (environ 30 à 60 mètres). (1)

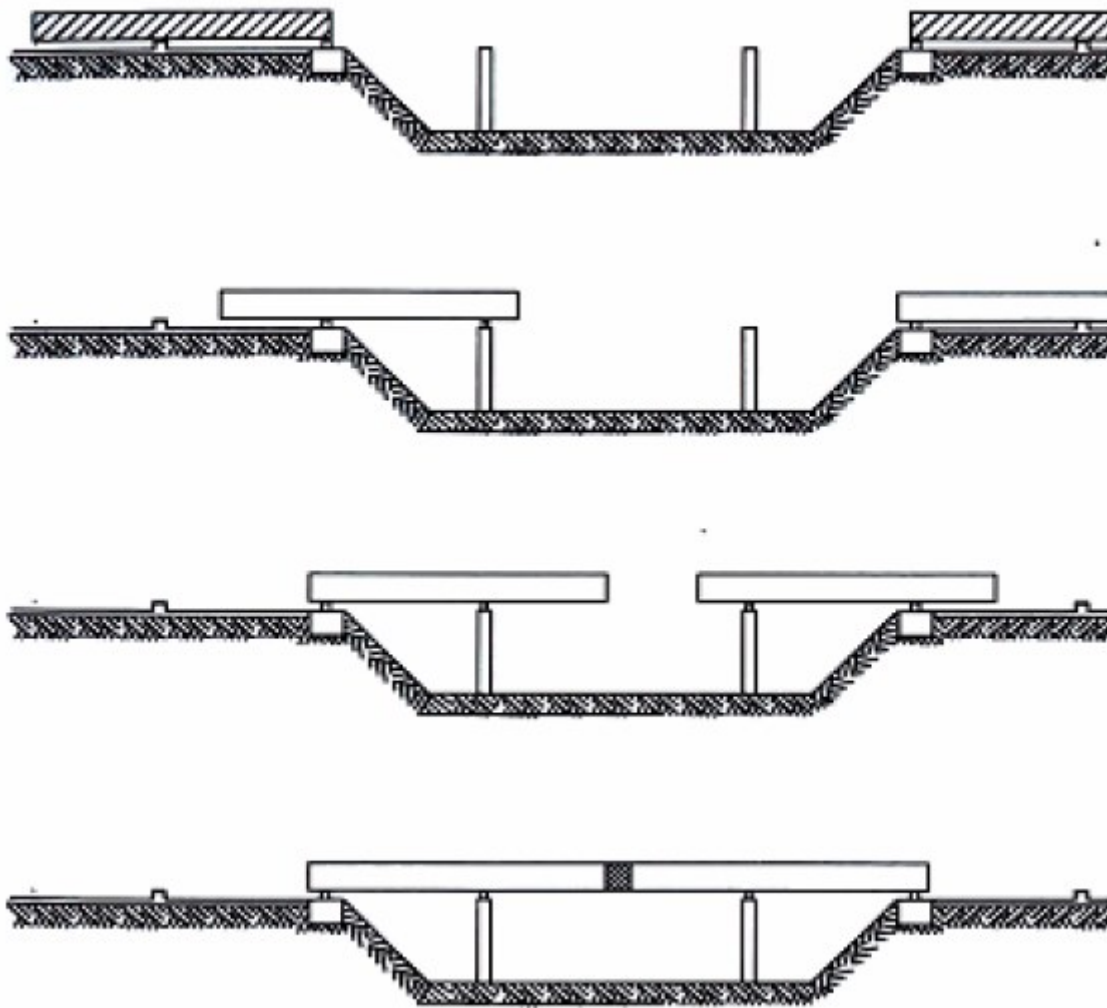


Figure I.9: Principe de pont poussé des deux coté

Ponts poussés unilatéralement :

Pour cette configuration, la construction s'effectue d'un seul côté de la brèche. Le tablier est réalisé par tronçons successifs, coulés sur une aire de préfabrication fixe placée derrière une des culées et alignée avec l'axe du pont. (1)

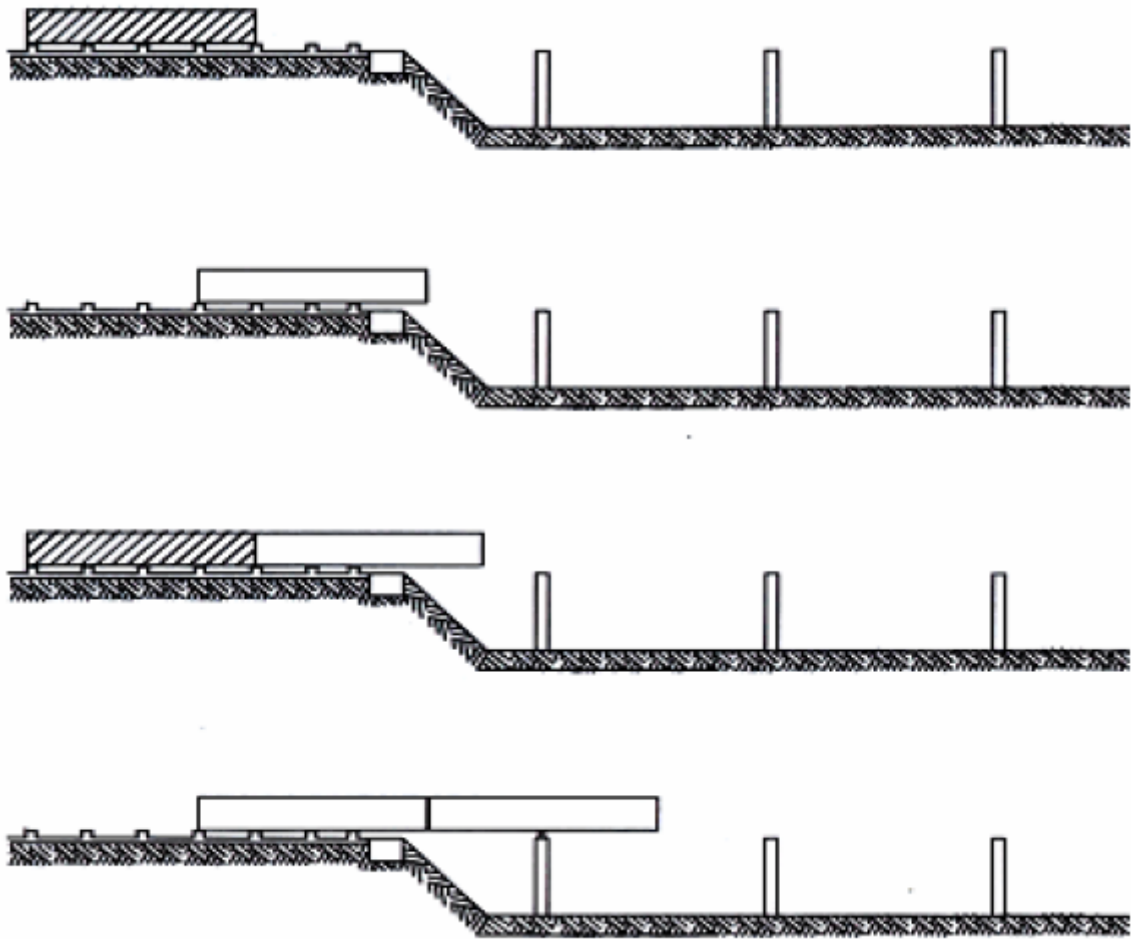


Figure I.10 : Principe de pont poussé d'un seul coté

Dans le cas des ouvrages de grande longueur à travées multiples, le tablier est poussé des deux côtés. Cette disposition peut être intéressante, notamment pour des ouvrages très long de façon à limiter les efforts de poussage à exercer, pour les ouvrages à géométrie comportant deux parties distinctes ou, enfin pour des raisons de délais d'exécutions.

I.6 Eléments de structure

I.6.1 La superstructure :

Pour les tabliers d'une largeur inférieure à 20 mètres, le type de caisson utilisé est le mono-caisson simple, une solution à la fois robuste et économique, capable de s'adapter aux différentes variations de hauteur que peut présenter un tablier.

Les mono-caissons sont constitués de trois parties principales :

- L'hourdis supérieur : la partie où les charges et surcharges seront appliquées.

- Les âmes : deux âmes inclinées pour réduire la largeur des têtes de piles mais aussi pour faciliter le décoffrage de celui-ci, l'inclinaison est de 10 degrés.
- L'hourdis inférieur.

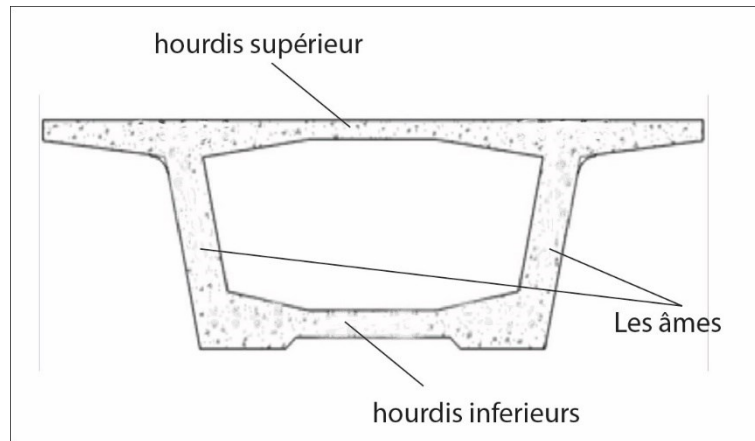


Figure I.11: Section transversale du voussoir

I.6.2 L'infrastructure :

I.6.2.1 Les piles

Les piles sont des éléments structuraux assurant la transmission des charges agissant sur le tablier, ainsi que de son poids propre, vers les fondations, puis vers le sol.

La section des piles P-1 à P-30 est de forme rectangulaire, tandis que celle des piles P-31 à P-34 est circulaire, en raison des effets hydrodynamiques liés à la présence d'eau à leur emplacement.

- Pile rectangulaire : 2,5m x 5,5m
- Pile circulaire : $D = 3,5 \text{ m}$

Tableau I.2: caractéristiques des piles

PILIER	POSITION	HAUTEUR DES PILES (m)	SECTION (m ²)	CHEVETRE (m X m)
P-1	1+815,50	12,55	Rectangulaire	9.5x2.5
P-2	1+851,50	13,7	Rectangulaire	9.5x2.5
P-3	1+887,50	14,2	Rectangulaire	19.5x2.5
P-4	1+925,25	16	Rectangulaire	19.5x2.5
P-5	1+951,00	16,5	Rectangulaire	19.5x2.5
P-6	1+976,50	16,7	Rectangulaire	19.5x2.5
P-7	2+002,50	17,1	Rectangulaire	19.5x2.5
P-8	2+050,75	17,4	Rectangulaire	9.5x2.5
P-9	2+099,00	17,4	Rectangulaire	9.5x2.5
P-10	2+147,25	17,4	Rectangulaire	9.5x2.5
P-11	2+195,50	17,4	Rectangulaire	9.5x2.5
P-12	2+243,75	17,4	Rectangulaire	9.5x2.5
P-13	2+292,00	17,4	Rectangulaire	9.5x2.5
P-14	2+340,25	18,5	Rectangulaire	9.5x2.5
P-15	2+388,50	18,4	Rectangulaire	9.5x2.5
P-16	2+434,75	18,6	Rectangulaire	9.5x2.5
P-17	2+485,00	18,75	Rectangulaire	9.5x2.5
P-18	2+536,00	18,2	Rectangulaire	9.5x2.5
P-19	2+587,00	18,35	Rectangulaire	19.5x2.5
P-20	2+617,00	18,4	Rectangulaire	19.5x2.5
P-21	2+647,00	18,35	Rectangulaire	19.5x2.5
P-22	2+677,00	18,45	Rectangulaire	19.5x2.5
P-23	2+707,00	18,45	Rectangulaire	19.5x2.5
P-24	2+737,00	18,16	Rectangulaire	9.5x2.5
P-25	2+796,50	17,93	Rectangulaire	9.5x2.5
P-26	2+835,00	17,72	Rectangulaire	9.5x2.5
P-27	2+873,50	16,47	Rectangulaire	9.5x2.5
P-28	2+924,50	14,23	Rectangulaire	9.5x2.5
P-29	2+975,50	12,79	Rectangulaire	9.5x2.5
P-30	3+026,50	12,85	Rectangulaire	9.5x2.5
P-31	3+077,50	15,35	Circulaire	9.5x2.5
P-32	3+122,50	14,05	Circulaire	9.5x2.5
P-33	3+167,50	12,25	Circulaire	9.5x2.5
P-34	3+212,50	10,45	Circulaire	9.5x2.5

Ainsi, les piles peuvent être regroupées en trois types :

Type 1 : Section rectangulaire avec chevêtre de 9.5mx2.5m.

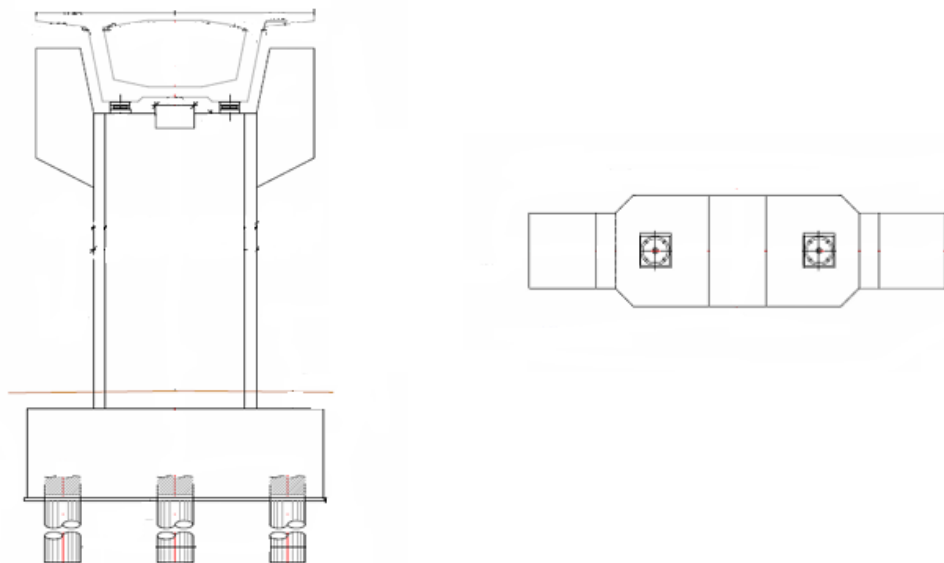


Figure I.12: Profil en plan et en travers de la pile Type 1

Type 2 : Section rectangulaire avec chevêtre de 19.5mx2.5m (pour les piles qui supportent les stations aériennes)

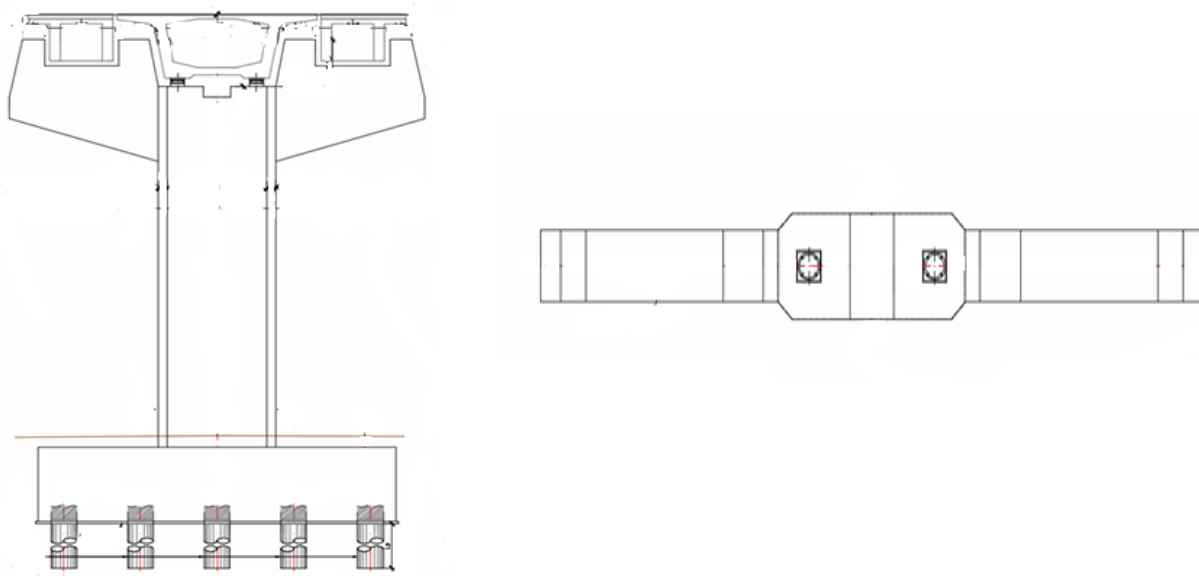


Figure I.13: Profil en plan et en travers de la pile Type 2

Type 3 : Section circulaire avec chevêtre de 9.5mx2.5m.

(Une section rectangulaire n'a pas été retenue pour ces piles afin de minimiser l'impact hydraulique de la rivière. De plus, le choix d'une section circulaire permet de conserver une configuration alignée du viaduc, ce qui est structurellement plus efficace).

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

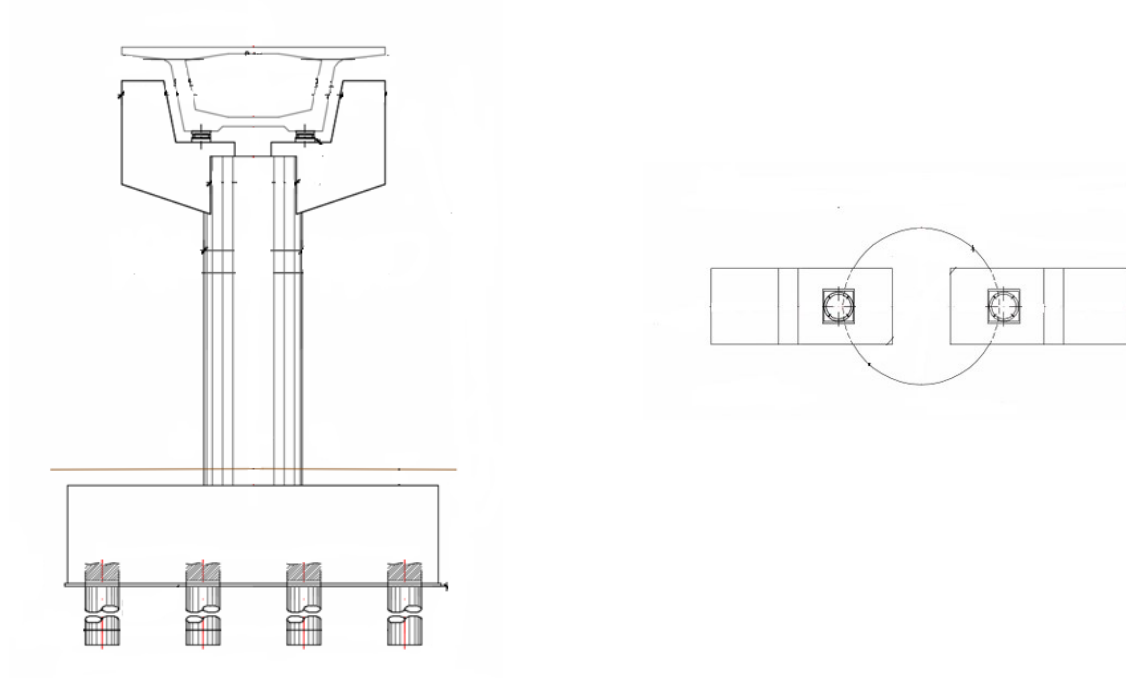


Figure I.14: Profil en plan et en travers de la pile Type 3

I.6.3 Les culées :

Les culées seront construites sous forme de caissons en béton armé, composés de deux contreforts intérieurs.

This technical drawing is a cross-section of a building. It features a sloped roof on the left side, a staircase in the middle, and a foundation with a series of columns. The drawing includes various dimensions and structural details, such as the placement of columns and the thickness of walls. The columns are shown in cross-section, and the foundation is depicted with a stippled pattern. The drawing is oriented horizontally, with the building's length extending from left to right.

The drawing shows a cross-section of a building. The roof is sloped, with a horizontal span of 1.00 and a vertical rise of 0.25. The building has a base of 1.25. The foundation is shown with a series of columns, each with a diameter of 0.25. The drawing is a technical sketch, likely for a structural analysis or design purpose.

I.6.4 Les appareils d'appuis :

Des appareils d'appui pendulaires de type "Double Sliding Isolation Pendulum avec recentrage (SIP)" sont installés sur les piles et les deux culées.

Chaque pile sera munie de deux appareils d'appuis du même type. 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).

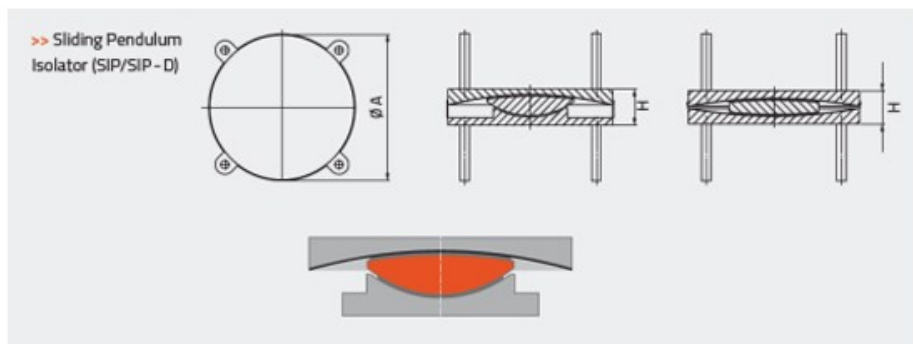


Figure I.17: Appareil d'Appui de type (SIP)

- 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, on utilise des appuis glissants provisoires.

I.7 Processus constructif

Le processus constructif consiste à pousser le tablier à partir de deux culées, étant donné qu'en raison de la configuration du tracé en plan et en long, il est impossible de procéder à une poussée à partir d'une seule culée.

Le viaduc est ainsi divisé en trois tronçons distincts :

- Tronçon 1 – Poussé depuis la culée C-1
- Tronçon 2 – Coulé in situ
- Tronçon 3 – Poussé depuis la culée C-2

I.7.1 Détails du processus de poussage (exemple du tronçon 1 – C1 à P23) :

- Montage de l'avant-bec de poussage sur le vérin de poussage
- Montage des coffrages extérieurs de la section.
- Montage du ferrailage du voussoir N°1, des gaines de précontrainte de poussage et montage du coffrage intérieur
- Bétonnage du voussoir
- on laisse le béton du voussoir acquérir une résistance nécessaire pour pouvoir mettre en tension la précontrainte de poussage.
- Connexion de l'avant-bec de poussage au voussoir N°1.
- Poussage de l'avant-bec qui tire le voussoir N°1 en dehors de l'atelier de fabrication
- Montage du ferrailage du voussoir N°2 et des gaines de précontrainte de poussage et montage du coffrage intérieur et bétonnage
- Mise en tension de la précontrainte de poussage du voussoir N°2 après maturation du béton
- Poussage du voussoir N°1 qui tire le voussoir N°2 en dehors de l'atelier de fabrication
- Ce processus est répété avec tous les voussoirs jusqu'à arriver à la travée N°23.
- Une fois le poussage du tronçon terminé on monte une tourelle provisoire à l'extrémité du tablier (depuis la pile P-23) et des tours d'échafaudage auxiliaires et on démonte l'avant-bec de poussage.

I.7.2 Construction du tronçon coulé sur place :

- Réalisation après poussage des deux tronçons adjacents
- Montage des cintres, coffrages, ferrailage
- Bétonnage en deux phases
- Maturation (7 jours)
- Connexion aux tronçons adjacents par précontrainte
- Retrait des cintres

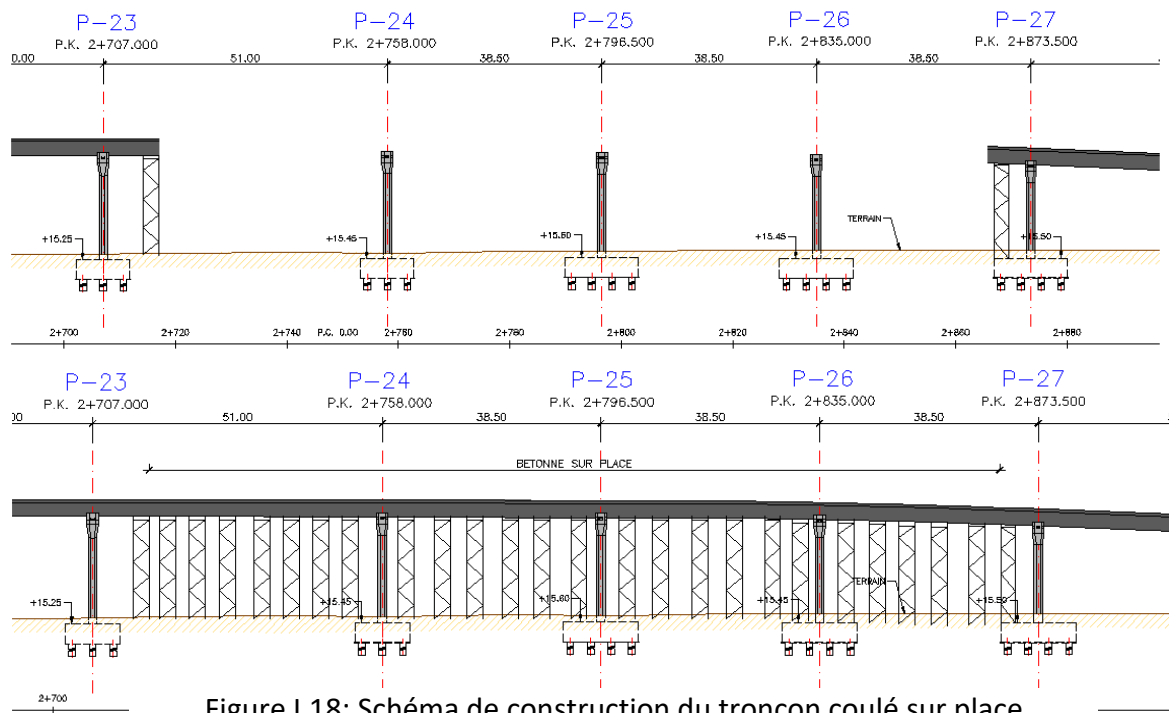


Figure I.18: Schéma de construction du tronçon coulé sur place

Phase finale :

- Mise en place de la précontrainte extérieure sur l'ensemble du viaduc
- Remplacement des appuis provisoires par les appuis définitifs via vérins de levage placés entre tablier et tête de pile

I.7.3 Manœuvre de poussage :

La séquence de poussage repose sur le cycle suivant :

1. Appui du tablier sur appui provisoire (élément de retenue)
2. Levée du tablier par vérin vertical
3. Poussée via vérin horizontal (course de 25 cm, rendement estimé à 5–7 m/h)
4. Repose du tablier sur appui
5. Réinitialisation du vérin horizontal

Ce cycle est répété jusqu'à la sortie du voussoir de la zone de fabrication

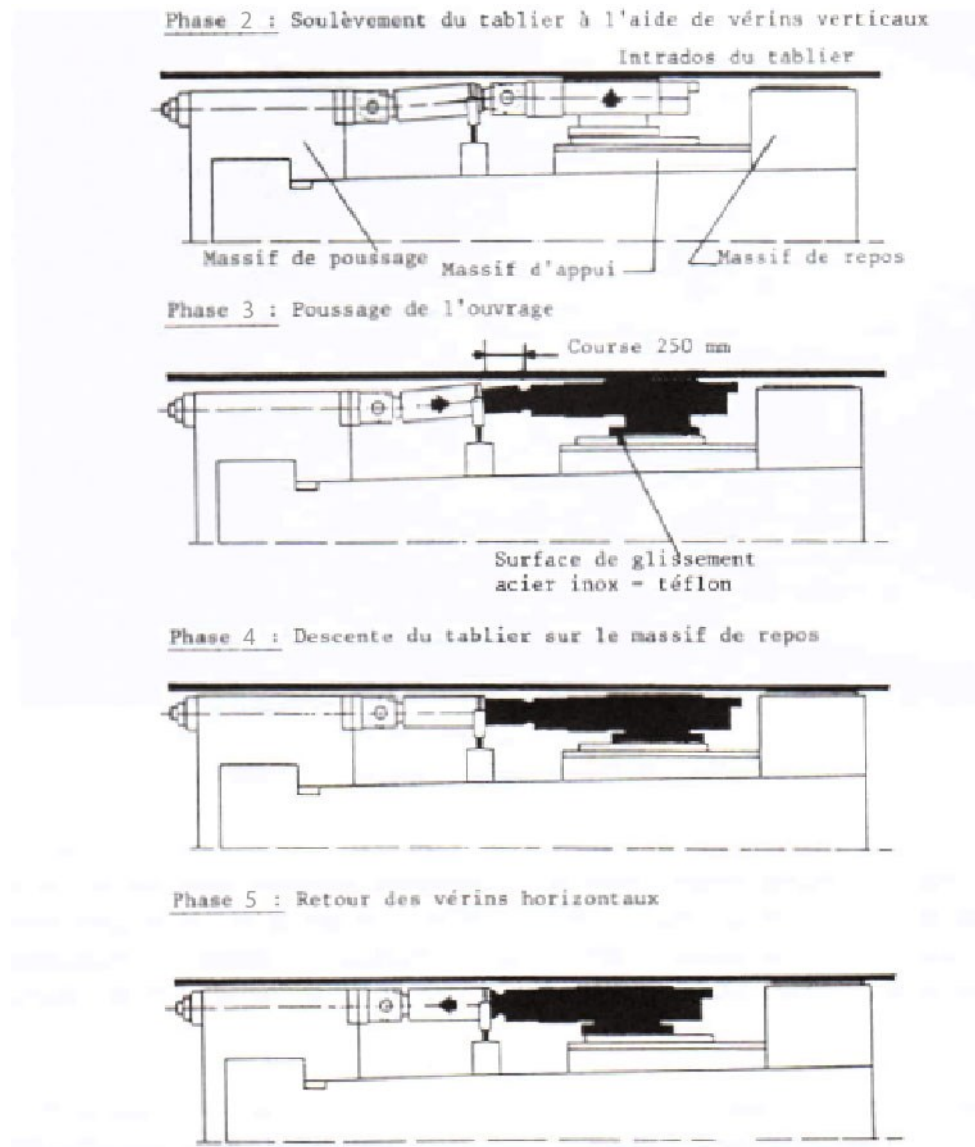


Figure I.19: Schémas des différentes phases de poussage (2)

I.8 Matériaux

Le choix des matériaux constitue une étape primordiale afin d'aboutir à une structure performante, durable et adaptée aux contraintes du projet

I.8.1 Béton :

- C30/37 : particulièrement utilisé pour les piles et les culées
- C40/50 : Tablier

I.8.2 Acier :

- Fe E 500 : armatures passives de haute ductilité
- Fe E 500 : maille électro soudée.
- S 355 : Acier en profils métalliques
- ASTM A416-85 1670/1860 Acier précontrainte

I.8.3 Caractéristiques de l'acier des câbles de la précontrainte :

La précontrainte utilisée sera de deux types :

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

Les torons qui seront utilisés dans les deux types de précontraintes cités antérieurement, 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 : 15.7 mm
- Section nominale : 150.00 mm²

Les câbles auront les caractéristiques suivantes :

- Câbles constitués de 12 ou 27 torons : 12T15 Ø0.6'' ou 27T15 Ø0.6''
- Gaines standards Ø85mm ou Ø105mm

- Les câbles seront précontraints jusqu'à 75 % de sa limite de rupture :

$$12T15\phi \rightarrow 1860(\text{N/mm}^2) \times 150 (\text{mm}^2) \times 12 \times 75\% = 2511 \text{ kN}$$

$$27T15\phi \rightarrow 1860(\text{N/mm}^2) \times 150 (\text{mm}^2) \times 27 \times 75\% = 5649.75 \text{ kN}$$

Le positionnement des barres d'armature doit permettre un bétonnage optimal. Toutes les barres, ou groupes de barres, doivent être parfaitement enrobées de béton. Les espacements nécessaires à la mise en œuvre des vibreurs doivent être pris en compte. Les longueurs d'ancrage et de recouvrement des armatures, ainsi que les rayons de courbure des barres, seront déterminés conformément aux exigences de l'Eurocode.

I.9 Prédimensionnement de la section transversale :

Le prédimensionnement est l'étape initiale et la plus cruciale de toute conception en Génie Civil. Il constitue la base sur laquelle repose la viabilité technique et économique d'un ouvrage. Réussir cette phase permet d'optimiser considérablement les calculs ultérieurs, d'anticiper les défis et d'assurer un déroulement efficace du projet, minimisant ainsi les ajustements et les retards coûteux.

I.9.1 Conception de la section transversale :

I.9.1.1 Choix du type de tablier :

Sachant que la travée la plus longue de notre ouvrage est de 51m.

Notre tablier sera constitué de Poutres-caisson, justifiée par la vérification (2):

$$40 \text{ m} \leq L_{\text{portée}} = 51\text{m}$$

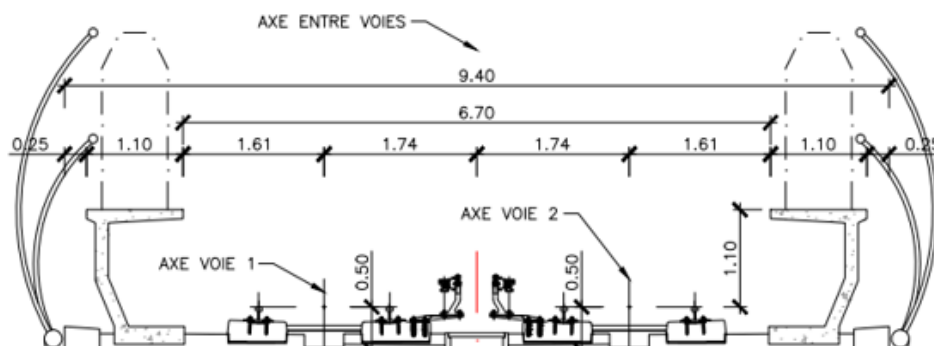


Figure I.20: Profil transversal adopté

Le profil transversal est constitué de :

- Une plateforme ferroviaire d'une largeur de 6,7m

- Un Passage de secours de chaque côté avec une largeur de 1,1 m.
- Une corniche, qui occupe une distance de 0,25 m

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

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

I.9.1.2 Choix du type de caisson :

Le choix de type de caisson dépend de la largeur du tablier

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

Dans notre cas :

$B = 9.4 \rightarrow B < 15 \text{ m} \rightarrow$ mono-caisson simple à deux âmes.

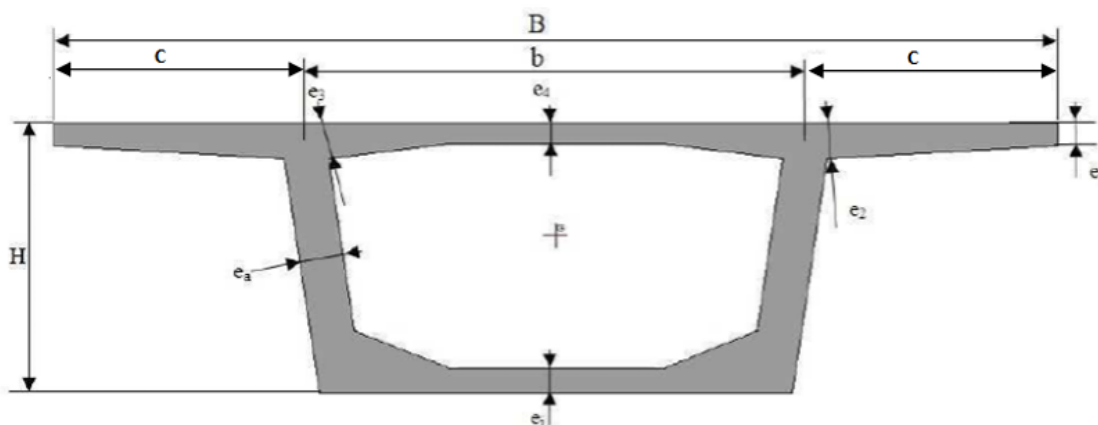


Figure I.21: section transversale du mono-caisson simple à deux âmes

I.9.1.3 Épaisseur du Hourdis Supérieur :

L'épaisseur du hourdis supérieur est un élément critique, principalement déterminée par deux facteurs majeurs : sa capacité à résister efficacement à la flexion transversale et aux charges concentrées. De plus, elle doit impérativement permettre l'intégration des câbles de précontrainte longitudinaux, essentiels pour la méthode de poussage. Pour les ponts ferroviaires, cette épaisseur est généralement de 30 cm, assurant ainsi la robustesse nécessaire pour ce type d'ouvrage. (2)

- On prend donc : $e_4 = 30 \text{ cm}$
- Nous calculerons aussi l'épaisseur e_1 qui dépend de la barrière de sécurité (Nous avons des barrières de type BN4) $\Rightarrow 20 \text{ cm} < e_1 < 25 \text{ cm}$
On prendra $e_1 = 25 \text{ cm}$.

I.9.1.4 Épaisseur des âmes :

Pour les ponts ferroviaires, l'épaisseur courante des âmes est généralement fixée à 50 cm, particulièrement pour des portées usuelles allant de 40 à 50 mètres. (2)

- On prend également $e_a = 50\text{cm}$

I.9.1.5 Hauteur du voussoir :

Étant donné que notre ouvrage est conçu par poussage, il est primordial que la hauteur sur pile et la hauteur du voussoir courant soit similaire, chaque voussoir passera par les piles.

L'élancement du tablier suit un rapport prédéfini qui est compris entre 15-16 pour les ponts de type ferroviaire.

$$\frac{1}{15} < \frac{H}{L} < \frac{1}{16} \quad (I.1)$$

Avec $L = 51\text{m}$.

Ce qui implique une hauteur H comprise entre $\Rightarrow 3,18 < H < 3,4$

- On prend $H = 3,25\text{ m}$

I.9.1.6 Longueur d'encorbellement :

On calculera la longueur d'encorbellement avec la relation suivante. (2)

$$C = \frac{B - b}{2} = \frac{9,4 - 4,7}{2} = 2,35\text{m} \quad (I.2)$$

B : largeur du voussoir $\Rightarrow 9.4\text{m}$

b : la distance entre les aces des deux âmes au niveau de l'hourdis supérieure, généralement prise comme la moitié de la largeur du voussoir soit : $B/2\text{m}$

-Enracinement de l'encorbellement (e_2) :

e_2 est comprise entre $C/5$ et $C/7$ avec $C=2.35\text{m}$

$$\frac{C}{7} \leq e_2 \leq \frac{C}{5} \Rightarrow 0,335 \leq e_2 \leq 0,47$$

On prend : $e_2 = 0,35\text{ m}$

- épaisseur à l'encastrement :

On a :

$$e_3 = 0.1 + \frac{b}{25} = 0.1 + \frac{4.7}{25} = 0,288\text{m}$$

On prend : $e_3 = 0,3 \text{ m}$

I.9.1.7 Hourdis inférieur :

En général, l'épaisseur se situe entre 30 et 60cm (2)

Nous prendrons donc $e_i = 30\text{cm}$

I.9.1.8 Largeur de la base :

Les âmes présentent de grande facilité en termes de coffrage et décoffrage lorsqu'elles sont inclinées. L'inclinaison couramment adoptée est comprise entre 10 et 30. (2)

On prend l'inclinaison de 10 degrés

On trouve $b = 4,1\text{m}$

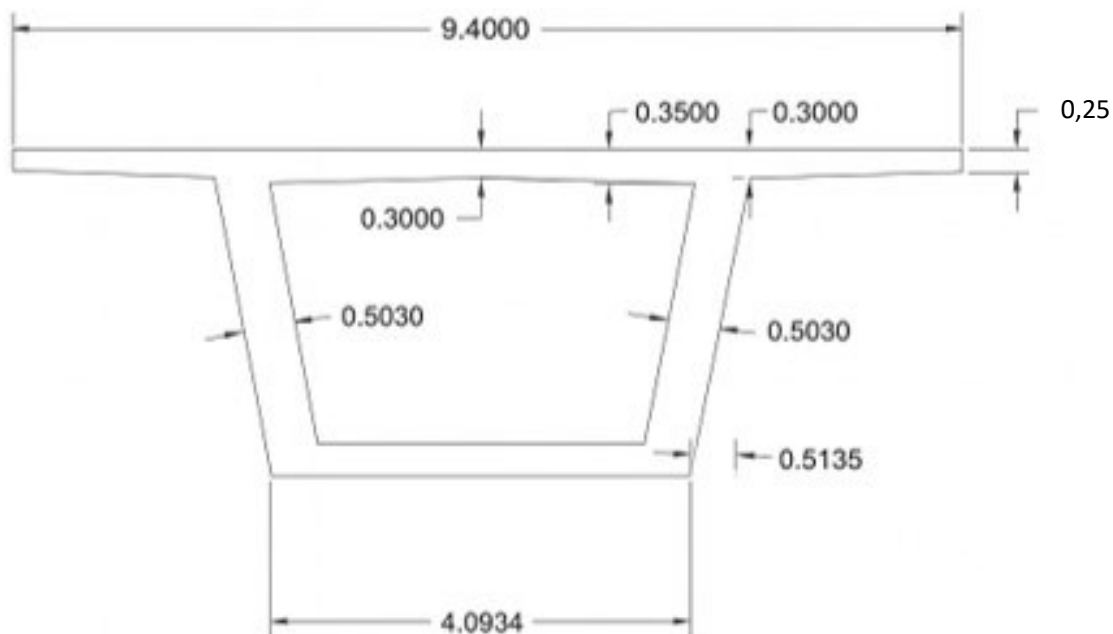


Figure I.22: Section transversale du caisson

surface : $A = 6,8 \text{ m}^2$

Les moments d'inertie par rapport à l'axe : $I_x = 10,9 \text{ m}^4$

Les moments d'inertie par rapport à l'axe y : $I_y = 32,8 \text{ m}^4$

Conclusion :

Durant ce chapitre une présentation globale de l'ouvrage, de ses éléments constructifs ainsi que des matériaux de construction utilisés, de plus nous avons pu établir le prédimensionnement des voussoirs qui représentent la superstructure du viaduc.

CHAPITRE II

ESTIMATION DES CHARGES ET SURCHARGES ET CALCUL DES SOLLICITATIONS

II.1 Introduction

Dans cette partie, nous évaluerons les charges et surcharges appliquées à notre structure, incluant les charges permanentes, d'exploitation et climatiques, aussi bien en phase de construction qu'en phase d'utilisation, sous différentes combinaisons. Par la suite à l'aide des logiciels Midas Civil et CSI Bridge, nous simulerons les différentes phases de poussage de notre viaduc, ainsi que la modélisation en phase de service, pour le calcul de toutes les sollicitation présente.

II.2 Calcul des charges et surcharges

L'estimation des charges et surcharges commence par la détermination des charges permanentes (poids propres des éléments structuraux et non structuraux) et par la suite les actions variables qui affecterons la structure.

II.2.1 Charges permanentes

II.2.1.1 Poids propre des éléments structuraux :

Les voussoirs :

Poids de la poutre caisson par mètre linéaire :

$$P_v = A \times \rho$$

P_v : Poids propre du voussoir

A_v : l'aire du voussoir

ρ : poids volumique du béton (25KN/m³)

$$P_v = 6,8 \times 25 = 170 \text{ kN/m}$$

II.2.1.2 Poids propre des éléments non structuraux :

La plateforme en béton, les passages de secours, les corniches, ainsi que les rails et les traverses sont tous considérés comme des éléments non structuraux. Leur poids propre est défini dans le tableau II.1

Tableau II.1: Poids propres des éléments par mètre

ELEMENT	POIDS PROPRE (KN/M)
PLATEFORME EN BETON	26
PASSAGE DE SECOURS (X2)	25
CORNICHE (X2)	39
RAILS ET TRAVERSE	15
CHARGE TOTALES	105

II.2.2 Actions variables

II.2.2.1 Actions dues au trafic ferroviaire

Le schéma de charges est fourni par la fiche UIC n° 702 (3), et pour les règles d'application est donné par fiche UIC n° 776-1 (4)

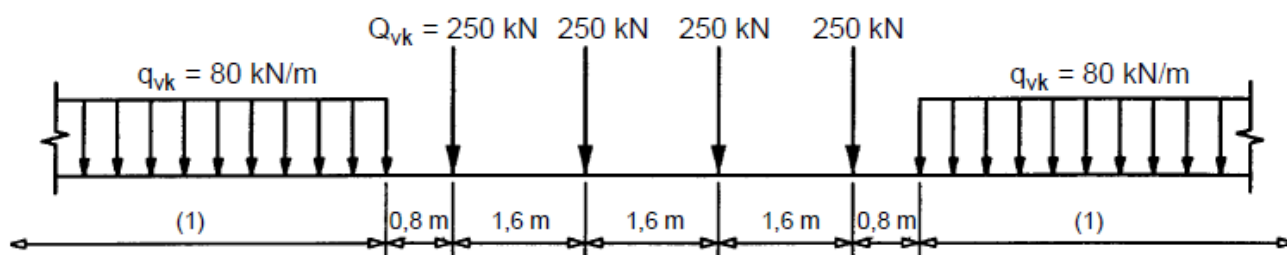
-Charges verticales :

Les charges verticales du trafic ferroviaire sont définies au moyen de schémas de charges dont deux modèles sont indiqués ci-après :

II.2.2.1.1 Modèle de charges 71

Le modèle de charges 71 représente l'effet statique d'un chargement vertical résultant du trafic ferroviaire normal.

La disposition et les valeurs caractéristiques des charges verticales y sont définies comme indiqué à la Figure II.4 :



(1) Pas de restriction

Figure II.1 : Modèle de charges 71 et valeurs caractéristiques pour les charges verticales

Les valeurs caractéristiques indiquées en Fig. 1 sont multipliées par un coefficient α sur les lignes acheminant un trafic plus lourd ou plus léger que le trafic ferroviaire normal

Dans notre cas, bien que le trafic du métro soit plus léger que le trafic ferroviaire standard, et en l'absence de données spécifiques permettant de déterminer un coefficient adapté, nous avons, par mesure de sécurité, adopté la valeur par défaut $\alpha = 1$ pour l'ensemble des calculs.

Les poutres continues et structures similaires calculées avec le modèle de charge 71 doivent être calculés en plus avec le modèle de charge SW/0.

II.2.2.1.2 Schémas de charges SW/0

Le modèle de charges SW/0 représente l'effet statique de chargement vertical résultant d'un trafic ferroviaire normal sur les poutres continues.

La disposition et les valeurs caractéristiques des charges verticales y sont définies comme indiqué à la Fig.5 :

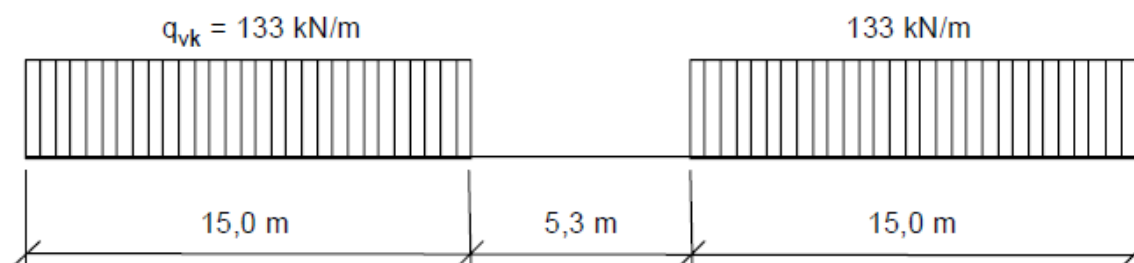


Figure II.2: Modèle de charges SW/0 et valeurs caractéristiques pour les charges verticales

II.2.2.1.3 Transmission des charges :

- Sur le plan longitudinal :

L'ouvrage est soumis à des charges verticales q , réparties équitablement entre les deux rails longitudinaux. La charge supportée par chaque rail se répartit longitudinalement conformément au schéma présenté ci-dessous. (5)

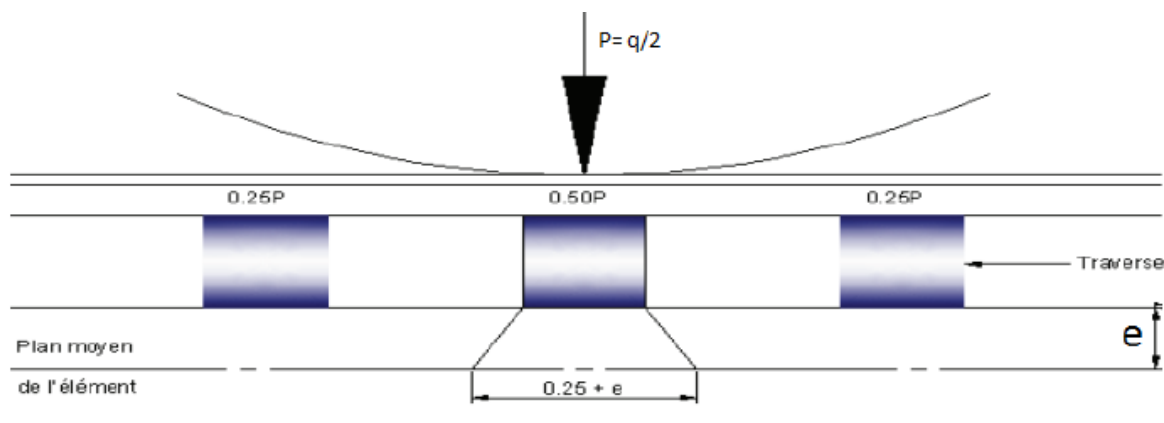


Figure II.3: Répartition de la charge longitudinalement

- **Sur le plan transversal :**

La charge sous le blochet se répartit comme indiqué dans la figure ci-dessous. (5)

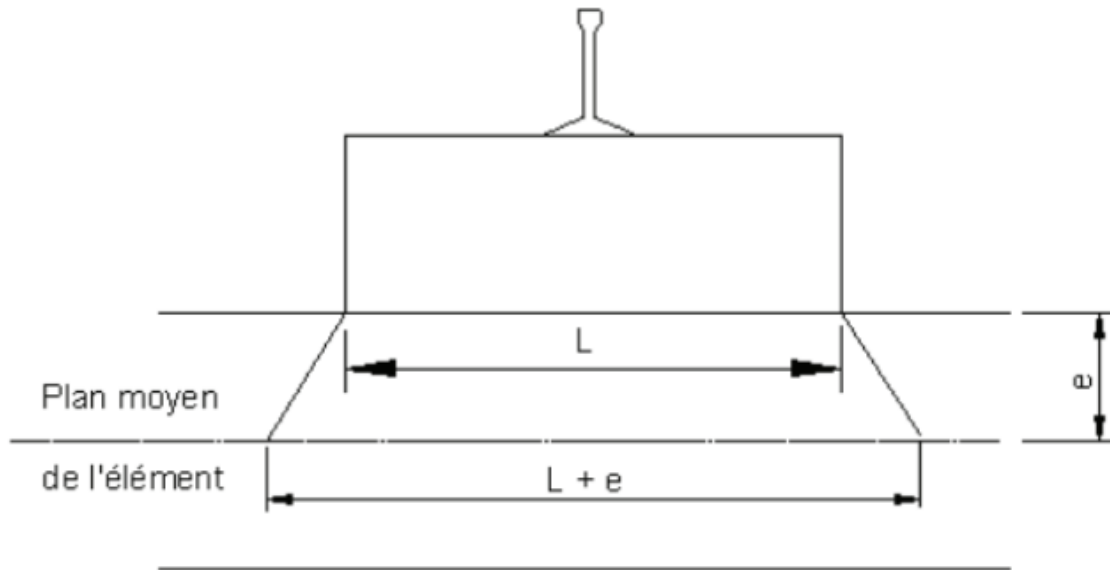


Figure II.4: Répartition de la charge transversalement

Avec $L = 0.4$ m (pour les traverses ou les blochets).

II.2.2.2 Charge générale pour les pistes de service non accessibles au public :

Les pistes de service non accessibles au public sont celles dont l'usage est réservé aux seules personnes autorisées.

Les charges de piétons, de cycles et de maintenance générale doivent être représentées par une charge uniformément répartie avec une valeur caractéristique $q_{fk} = 5$ KN/m² (4)

II.2.2.3 Effets dynamiques

Les effets dynamiques sont pris en compte, au moyen des coefficients ϕ_2 ou ϕ_3 .

Définition du coefficient dynamique :

Le coefficient dynamique qui augmente les effets de la charge statique dans les modèles de charges 71, SW/0 est défini en tant que ϕ_2 et ϕ_3

En général, le coefficient dynamique est défini en fonction de la qualité de la maintenance de la voie selon les modalités suivantes : (4)

1. pour une voie bénéficiant d'une maintenance soignée :

$$\phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\phi - 0,2}} + 0,82 \quad (II.1)$$

$$1 \leq \phi_2 \leq 1.67$$

2. pour une voie bénéficiant d'une maintenance standard :

$$\phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\phi - 0,2}} + 0,73 \quad (II.2)$$

$$1 \leq \phi_3 \leq 2$$

L_ϕ : Longueur caractéristique, dépend de l'élément de structure (voir Tableau suivant, cas 5.2)

Tableau II.2: Longueur déterminante (4)

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 :	$L_\phi = k \times L_m$, mais au moins $\max L_i (i = 1, \dots, n)$			
	$L_m = 1/n(L_1 + L_2 + \dots + L_n)$	n = 2	3	4	≥ 5
		k = 1,2	1,3	1,4	1,5

L_m : la longueur moyenne des travées

n : nombre de travées

$$L_m = 41.82\text{m}$$

$$\rightarrow L_\phi = 1,5 \times 41.82 = 62.74 \text{ m}$$

$$\rightarrow \phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\phi - 0,2}} + 0,82 = \frac{1,44}{\sqrt{62.74 - 0,2}} + 0,82 = 1,002$$

$$\rightarrow \phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\phi - 0,2}} + 0,73 = \frac{2,16}{\sqrt{62.74 - 0,2}} + 0,73 = 1,0031$$

II.2.2.4 Forces horizontales

L'ouvrage subit de nombreuses forces horizontales, telles que les effets du freinage, les actions sismiques, la dilatation thermique ou encore la poussée du vent.

II.2.2.4.1 Forces centrifuges

Les forces centrifuges doivent être pris en compte lorsque la voie posée sur le pont est en courbe sur la totalité ou une partie de l'ouvrage, étant donné que le tracé est composé de deux courbes de deux rayons différents ($R_1=1500\text{m}$; $R_2=1195\text{m}$), il y a lieu de prendre en compte la force centrifuge.

La valeur caractéristique de la force centrifuge est déterminée selon les équations suivantes : (4)

$$Q_{tk} = \frac{v^2}{127r} (fxQ_{vk}) \quad (II.3)$$

$$q_{tk} = \frac{v^2}{127r} (f x q_{vk}) \quad (II.4)$$

Où :

$Q_{tk}; q_{tk}$: Valeurs caractéristiques des forces centrifuges [kN, kN/m]

$Q_{vk}; q_{vk}$: Valeurs caractéristiques des charges verticales spécifiées pour les schémas de charges 71, SW/0,

f coefficient de réduction qui vaut 1, lorsque $V < 120$ km/h

V vitesse maximum [km/h]

r rayon de courbure [m].

Pour une vitesse maximale de 70 km/h on obtient pour chaque voie :

charges 71	charges SW/0
$Q_{tk}(1500m) = 6.43$ kN	$q_{tk}(1500m) = 3.42$ kN/m
$Q_{tk}(1195m) = 8.07$ kN	$q_{tk}(1195m) = 4.29$ kN/m
$q_{tk}(1500m) = 2.05$ kN/m	
$q_{tk}(1195m) = 2.58$ kN/m	

II.2.2.4.2 Effort de lacet

L'effort de lacet est modélisé comme une force concentrée agissant dans un plan horizontal, au niveau supérieur des rails, perpendiculairement à l'axe de la voie. Il s'applique aussi bien aux voies en alignement qu'à celles en courbe.

La valeur caractéristique de l'effort de lacet est de $Q_{sk} = 100$ kN. (4)

II.2.2.4.3 Actions dues aux efforts de traction et de freinage :

Les efforts de traction et de freinage agissent au sommet des rails dans le sens longitudinal de la voie. Ils sont considérés comme uniformément répartis sur la longueur d'influence correspondante $L_{a,b}$ pour les effets de traction et de freinage sur l'élément de structure considéré (4)

Force de traction : $Q_{lak} = 33$ [kN/m] $\times L_{a,b} \leq 1\,000$ kN (II.5)

$$Q_{lak} = 33 \times 100 [\text{kN/m}] = 3300 \text{ kN} \geq 1\,000 \text{ kN}$$

$$\rightarrow Q_{lak} = 1\,000 \text{ kN}$$

Force de freinage : $Q_{lbk} = 20$ [kN/m] $\times L_{a,b} \leq 6\,000$ kN (II.6)

$$Q_{lbk} = 20 \times 100 [\text{kN/m}] = 2000 \text{ kN} \leq 6\,000 \text{ kN}$$

II.2.2.4.4 Actions dues aux variations de température

Les structures exposées aux conditions atmosphériques sont soumises à des actions provenant des variations de température.

La grandeur des variations de température est principalement influencée par les conditions climatiques régionales et locales ainsi que par le type d'ouvrage et les propriétés des matériaux.

Les variations de température dans une section peuvent être décomposées en :

-Une variation de température uniforme (température constante sur la hauteur de la section) :

Dans le cas de l'ouvrage situé à Alger : +35 °C et -15 °C

La moyenne comprise en 10 °C et 25 °, on a considéré pour être dans la sécurité les valeurs extrêmes

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

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

-Gradient thermique :

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

Tableau II.3: Valeurs caractéristiques des gradients linéaires de température (12)

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	[10]	[-5]	[10]	[-5]
- poutre en T	[15]	[-8]	[15]	[-8]
- dalle	[15]	[-8]	[15]	[-8]

Gradient de température positif : 10 °C

Gradient de température négatif : -5 °C

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

Dans notre cas l'épaisseur de revêtement est de 100 mm, il convient que ces valeurs soient multipliées par un coefficient k_{sur} , donné dans le tableau suivant.

Tableau II.4: Coefficients k_{sur} pour différentes épaisseurs de revêtement (12)

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

$K_{sur} = 0.7$

Ce qui donne un gradient de $\pm 7^\circ\text{C}$ à l'état de service.

II.2.2.4.5 Actions dues au vent

- Vent compatible avec les circulations W_1

Le vent est considéré comme soufflant horizontalement, perpendiculairement à l'axe longitudinal de la voie. La charge de vent appliquée aux surfaces exposées est de $1,5 \text{ kN/m}^2$.

Le matériel roulant est assimilé à un écran rigide d'une hauteur de 3,00 m, dont le bord inférieur est situé à 0,50 m au-dessus du niveau du rail. Sa longueur est déterminée de manière à produire la sollicitation maximale sur la structure.

En ce qui concerne le tablier du pont, la surface exposée au vent est prise égale à une hauteur de 3,25 m. $W_1 = \text{La hauteur du masque} \times \text{La pression normale à la surface en contact}$.

- $\text{La hauteur du masque} = \text{la hauteur du tablier} + \text{la hauteur d'écran} = 3.25 + 3 = 6.25 \text{ m}$

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

- $W_1 = 6.25 \times 1.5 = 9.375 \text{ kN / m}$

- L'effort dû au vent sans circulation W_0

On suit le même cheminement 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

$$W_0 = 3.25 \times 2 = \mathbf{6.5 \text{ kN / m}}$$

II.2.3 Actions accidentelles :

L'action sismique sera évaluée en accord avec la norme RPOA 2008 et le RPA2024 (6).

Conditions générales :

- Zone de séisme Alger : Zone VI
- Groupe d'élément de construction : Groupe 1 Pont stratégique
- Classification de site : S4
- Coefficient d'accélération de zone : $A = 0,4$

II.2.4 Combinaisons de charges :

II.2.4.1 Combinaisons de charges en cours de poussage :

Lors des phases de poussage le pont est soumis à plusieurs à de nombreux efforts, qui sont :

G : poids propre ;

P : action de la précontrainte ;

W : action du vent ;

$\Delta\theta$: gradient thermique ;

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 :

En cours de déplacements :

$P + G + DA + \text{Pouss}$

En phase statique :

$P + G + DA + \Delta\theta$

II.2.4.2 Combinaisons de charges en service :

II.2.4.2.1 Définition des actions de circulation ferroviaire groupe de charge :

Les actions de circulation ferroviaire sont des actions composées organisées en groupes de charges. Ces derniers tiennent compte de la simultanéité des diverses charges élémentaires sur une ou plusieurs voies.

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.

Le tableau ci-dessous représente les différents groupes à considérer suivant une et deux voies

Tableau II.5: Groups de charges (4)

Nombre de voies sur la structure			Groupes de charges			Efforts verticaux			Efforts horizontaux			Commentaires
						2.3.2/2.3.3	2.3.3	2.3.4	2.5.3	2.5.1	2.5.2	
1	2	≥ 3	Nbre de voies chargées	Groupe de charges	Voie chargée	LM 71 ^a SW/0 ^{ab} HSLM ^{cd}	SW/2 ^{ae}	Train à vide	Traction freinage ^a	Effort centrifuge ^a	Effort de lacet ^a	
			1	gr11	T ₁	1			1 ^f	0,5 ^f	0,5 ^f	Max. vertical 1 avec max. longitudinal
			1	gr12	T ₁	1			0,5 ^f	1 ^f	1 ^f	Max. vertical 2 avec max. transversal
			1	gr13	T ₁	1 ^g			1	0,5 ^f	0,5 ^f	Max. longitudinal
			1	gr14	T ₁	1 ^g			0,5 ^f	1	1	Max. latéral
			1	gr15	T ₁			1		1 ^f	1 ^f	Stabilité latérale avec "Train à vide"
			1	gr16	T ₁		1		1 ^f	0,5 ^f	0,5 ^f	SW/2 avec max. longitudinal
			1	gr17	T ₁		1		0,5 ^f	1 ^f	1 ^f	SW/2 avec max. transversal
			2	gr21	T ₁ T ₂	1 1			1 ^f 1 ^f	0,5 ^f 0,5 ^f	0,5 ^f 0,5 ^f	Max. vertical 1 avec max. longitudinal
			2	gr22	T ₁ T ₂	1 1			0,5 ^f 0,5 ^f	1 ^f 1 ^f	1 ^f 1 ^f	Max. vertical 2 avec max. transversal
			2	gr23	T ₁ T ₂	1 ^g 1 ^g			1 1	0,5 ^f 0,5 ^f	0,5 ^f 0,5 ^f	Max. longitudinal
			2	gr24	T ₁ T ₂	1 ^g 1 ^g			0,5 ^f 0,5 ^f	1 1	1 1	Max. latéral
			2	gr26	T ₁ T ₂	1 1	1		1 ^f 1 ^f	0,5 ^f 0,5 ^f	0,5 ^f 0,5 ^f	SW/2 avec max. longitudinal
			2	gr27	T ₁ T ₂	1 1	1		0,5 ^f 0,5 ^f	1 ^f 1 ^f	1 ^f 1 ^f	SW/2 avec max. transversal

Remarque :



A prendre en compte lors du calcul d'une structure comportant deux voies (groupes de charge 11 à 27 sauf 15).

Chacune des deux voies sera considérée comme T1 (voie 1) ou comme T2 (voie 2).

II.2.4.2.2 Combinaisons d'actions et les coefficients partiels appropriés

Les combinaisons de charges sont prises conformément à l'article 1.7 du livret 2.01 de la SNCF p51 (5)

On désigne par :

- Gmax : L'ensemble des actions permanentes défavorables
- Gmin : 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.
- P : action de la précontrainte

- Q : actions variables.
- Q1 : actions de base.
- Qi : actions d'accompagnement
- Tk : actions thermiques
- W0 : action du vent sans circulation ferroviaire.
- W1 : action du vent avec circulation ferroviaire.
- AQS : accotements et quais solidaires
- ψ : Coefficient pour les actions variables (ELU et ELS)
- γ : Coefficient pour les actions à l'ELU.

Note : Les valeurs des coefficients ψ et γ sont données dans les tableaux 1, 2 et 3, Annex A de la fiche UIC n° 776-1

- ELU d'équilibre statique :

Forme générale :

$$\gamma_{G1} G1 + \gamma_{G2} G2 + \gamma_{Q1} Q1 + \sum 1.5 \psi_{Oi} Qi$$

Avec : $\gamma_{G1}=0.9$; $\gamma_{G2}=1.1$

Pour 2 voies chargées :

$$\begin{aligned} &\gamma_{G1} G1 + \gamma_{G2} G2 + 1.45 Gr22 + 1.2 AQS + 0.9 Tk + 0.9 W1 \\ &\quad \text{Max } [1.45 Gr21, 1.35 Gr24] + 1.2 AQS + 0.9 Tk \\ &\quad 1.5 Tk + 1.16 Gr21 + 1.2 AQS \end{aligned}$$

- ELU fondamentale :

Forme générale :

$$\gamma_P P_K + 1.35 G_{\max} + G_{\min} + \gamma_{Q1} Q1 + \sum 1.5 \psi_{Oi} Qi$$

$\gamma_P = 1.00$ dans le cas usuel.

Pour 2 voies chargées :

$$\begin{aligned} &\gamma_P P_K + 1.35 G_{\max} + G_{\min} + 1.45 Gr22 + 1.2 AQS + 0.9 Tk + 0.9 W1 \\ &\quad \text{Max } [1.45 Gr21, 1.35 Gr24] + 1.2 AQS + 0.9 Tk \\ &\quad 1.5 Tk + 1.16 Gr21 + 1.2 AQS \end{aligned}$$

- ELU sismiques :

Forme générale :

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

Pour 0 voies chargées :

$$G_{\max} + E$$

Pour 1 voies chargées :

$$G_{\max} + E + 0.3 Gr11$$

- ELS rares :

Forme générale :

$$P_k + G_{\max} + G_{\min} + Q_{K1} + \sum \psi_{Oi} Q_{Ki}$$

Pour 2 voies chargées :

$$P_k + G_{\max} + G_{\min} + Gr22 + 0.8 AQS + 0.6 Tk + 0.6 W1$$

- ELS fréquents :

Forme générale :

$$P_k + G_{\max} + G_{\min} + \psi_{21} Q_{k1} + 0.5 T_k$$

Pour 2 voies chargées :

$$P_k + G_{\max} + G_{\min} + 0.6 (Gr_{21} \text{ ou } Gr_{24}) + 0.5 T_k$$

- **ELS quasi-permanents :**

Forme générale :

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

- **ELS de fatigue :**

Forme générale :

$$P_k + G + Q_i + 0.5 T_k$$

II.3 Calcul des sollicitations :

II.3.1 Phase de poussage :

Dans cette partie, on procède aux calculs en phase de construction, et plus précisément durant la phase de poussage des voussoirs du tablier, afin d'évaluer les efforts internes générés lors de l'avancement du tablier sur les appuis. Ces calculs sont réalisés à l'aide du logiciel MIDAS Civil, qui permet de simuler le déroulement progressif du poussage et de prendre en compte les effets différés.

II.3.1.1 Modélisation

Tel qu'énoncé dans le premier chapitre, la réalisation de l'ouvrage s'est faite en 3 parties distinctes.

- Le poussage du premier tronçon : qui débute de la culée C-1 pour atteindre la pile P-23, et se fait sur une distance de 929.95m avec un rayon de 1500m. Il se compose d'un ensemble de voussoirs de longueurs qui varient de 17.5m à 31m pour le plus long.
- Le poussage du troisième tronçon : commence de la culée C-2 atteignant la pile P-27 sur une longueur totale de 388.95m avec un rayon de 1195m. Constitué d'un ensemble de voussoirs qui varient de 18.7 à 30m.

Pendant le processus de poussage l'ouvrage est soumis à diverses sollicitations qui sont prises en compte lors de la modélisation tels que :

- Le retrait/fluage.
- Les efforts de poussage.
- Les sollicitations dues à la dénivellation d'appuis sont prises en compte automatiquement par le logiciel Midas Civil.

II.3.1.2 Poussage 1 (tronçons 1) :

Durant le poussage 1, les voussoirs 1 à 37 seront bétonnés puis poussés.

Tableau II.6: Les longueurs des voussoirs du tronçon 1

VOUSOIR	LONGUEUR DE VOUSOIR (L)
VOUSOIR 1	21,600 m
VOUSOIR 2	30,000 m
VOUSOIR 3	30,000 m
VOUSOIR 4	30,000 m
VOUSOIR 5	30,000 m
VOUSOIR 6	30,000 m
VOUSOIR 7	30,000 m
VOUSOIR 8	30,000 m
VOUSOIR 9	21,000 m
VOUSOIR 10	21,000 m
VOUSOIR 11	21,000 m
VOUSOIR 12	21,000 m
VOUSOIR 13	21,000 m
VOUSOIR 14	27,250 m
VOUSOIR 15	27,250 m
VOUSOIR 16	27,250 m
VOUSOIR 17	21,000 m
VOUSOIR 18	27,250 m
VOUSOIR 19	21,000 m
VOUSOIR 20	21,000 m
VOUSOIR 21	21,000 m
VOUSOIR 22	21,000 m
VOUSOIR 23	21,000 m
VOUSOIR 24	27,250 m
VOUSOIR 25	27,250 m
VOUSOIR 26	27,250 m
VOUSOIR 27	27,250 m
VOUSOIR 28	27,250 m
VOUSOIR 29	27,250 m
VOUSOIR 30	25,750 m
VOUSOIR 31	25,750 m
VOUSOIR 32	31,000 m
VOUSOIR 33	31,000 m
VOUSOIR 34	30,000 m
VOUSOIR 35	30,000 m
VOUSOIR 36	17,500 m
VOUSOIR 37	19,500 m

II.3.1.3 Poussage 2 (tronçons 3) :

Tableau II.7: Les longueurs des voussoirs du tronçon 2

VOUSOIR	Longueur de voussoir (L)
VOUSOIR 38	18,715 m
VOUSOIR 39	30,024 m
VOUSOIR 40	21,017 m
VOUSOIR 41	30,024 m
VOUSOIR 42	21,017 m
VOUSOIR 43	30,024 m
VOUSOIR 44	21,017 m
VOUSOIR 45	30,024 m
VOUSOIR 46	20,216 m
VOUSOIR 47	25,620 m
VOUSOIR 48	19,416 m
VOUSOIR 49	25,620 m
VOUSOIR 50	19,416 m
VOUSOIR 51	25,620 m
VOUSOIR 52	21,019 m
VOUSOIR 53	30,472 m

II.3.1.4 Sollicitations dues au poids propre du tablier :

Lors de chaque poussage d'importantes sollicitations se créent agissantes sur le tablier.

Elles sont en quatre phases essentielles montrées dans la figure III.5 et Figure III.6 :

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

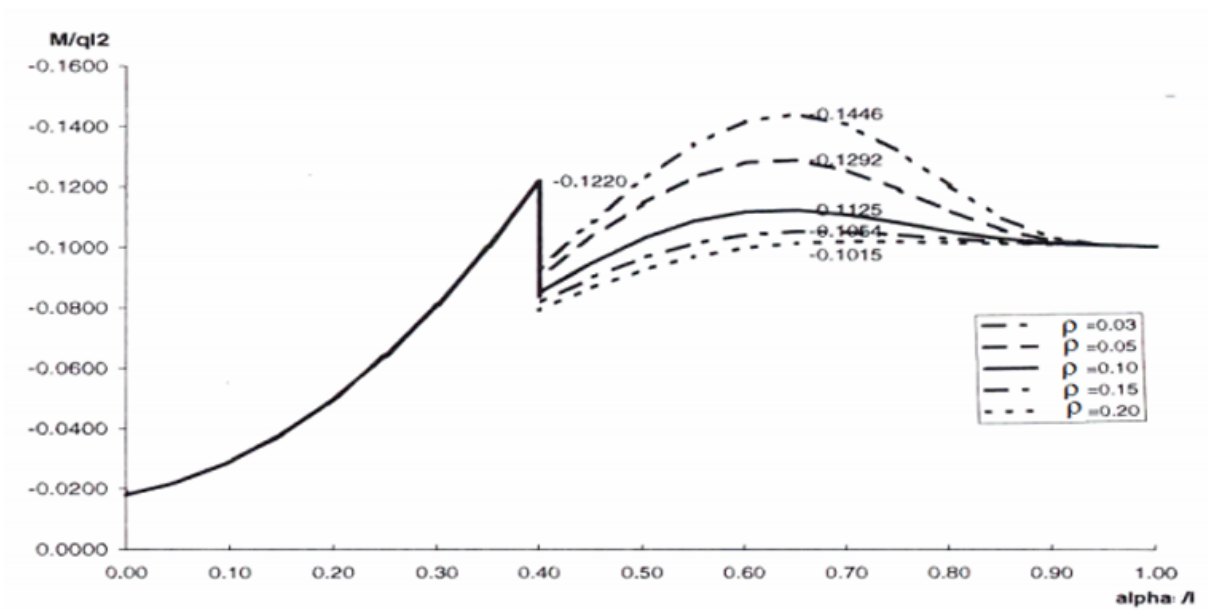


Figure II.5: Variation du moment maximal sur appui (1)

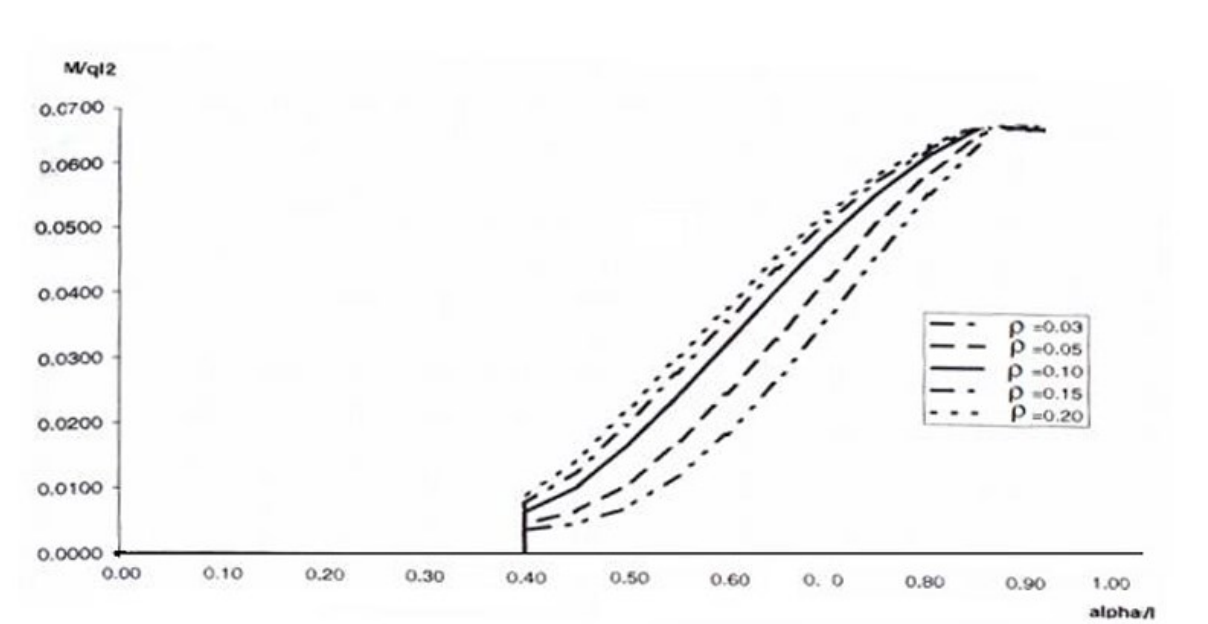


Figure II.6: Variation du moment maximal en travée (1)

II.3.1.5 Poussage du tronçon 3 :

Nous allons illustrer les étapes de poussage du tronçons 3, ainsi que les efforts que subis le tablier lors de chaque étape.

- Les différent voussoirs poussés sont définis dans le tableau Tableau II.7

II.3.1.5.1 Les phases de poussage :

Cette partie de l'ouvrage requière 160 phases de poussage (1m de poussage dans chaque phases) sur le logiciel pour parvenir à générer le tronçon en son entièreté, cela dit nous allons nous limiter à 17 phases selon le nombre de voussoir pour éviter un encombrement d'informations. La 17 -ème phases étant les efforts après retrait de l'avant bec.

Nous allons représenter les phases de poussage ainsi que les efforts générés :

❖ Phase 1

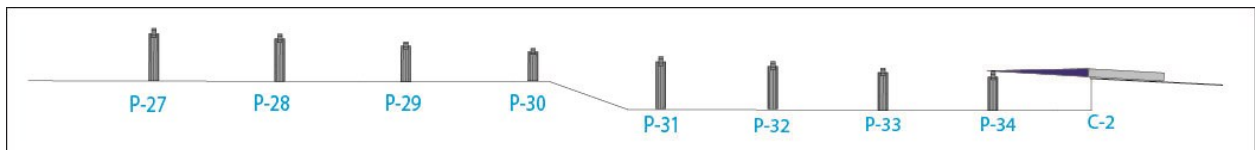


Figure II.7: Schéma statique de la phase 1

Tableau II.8: Les sollicitations maximales de la phase 1

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
0	-512,2	298,3

❖ Phase 2

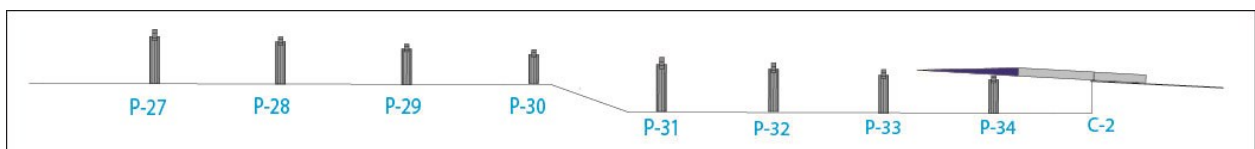


Figure II.8: Schéma de la phase 2

Tableau II.9: Les sollicitations maximales de la phase 2

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
7449,1	-1607,6	2494

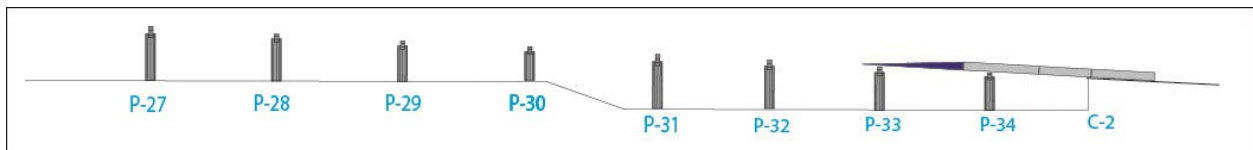
❖ Phase 3

Figure II.9: Schéma de la phase 3

Tableau II.10: Les sollicitations maximales de la phase 3

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
6004,3	-6600,9	4065,3

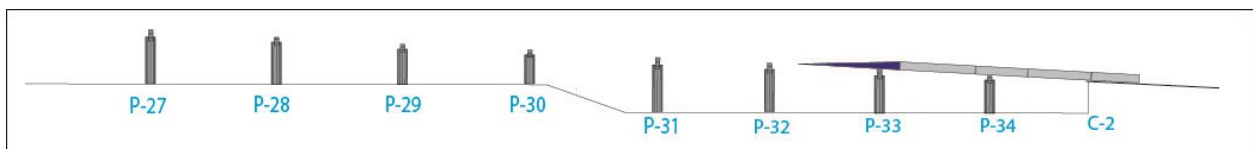
❖ Phase 4

Figure II.10: Schéma de la phase 4

Tableau II.11: Les sollicitations maximales de la phase 4

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
16983,9	-26048,7	7281,1

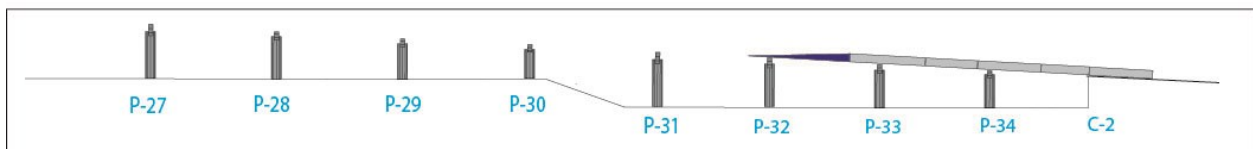
❖ Phase 5

Figure II.11: Schéma de la phase 5

Tableau II.12: Les sollicitations maximales de la phase 5

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
18680	-25248,6	7321,5

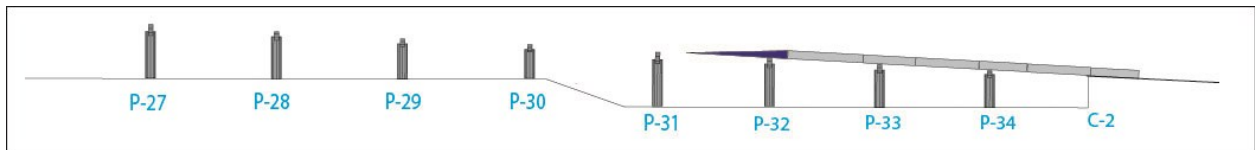
❖ Phase 6

Figure II.12: Schéma de la phase 6

Tableau II.13: Les sollicitations maximales de la phase 6

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
25934,1	-37291,7	9494,1

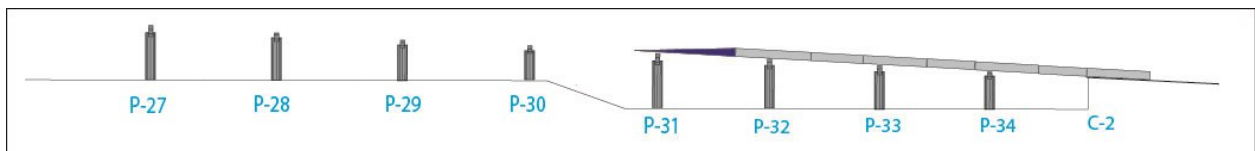
❖ Phase 7

Figure II.13 : Schéma de la phase 7

Tableau II.14: Les sollicitations maximales de la phase 7

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
17415,7	-33834,3	8589,2

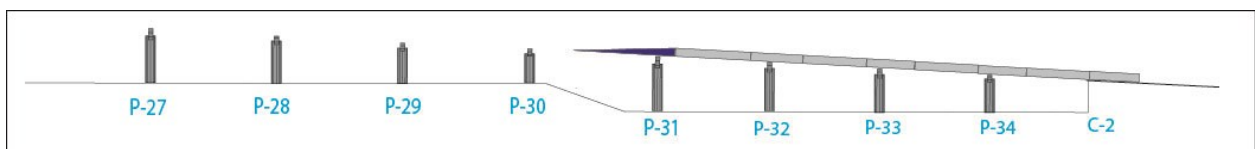
❖ Phase 8

Figure II.14: Schéma de la phase 8

Tableau II.15: Les sollicitations maximales de la phase 8

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
27427,3	-37655,7	9628,9

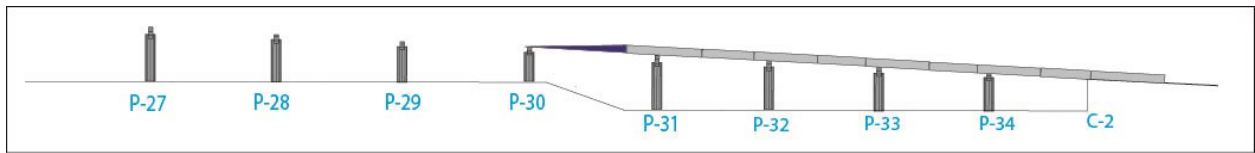
❖ Phase 9

Figure II.15: Schéma de la phase 9

Tableau II.16: Les sollicitations maximales de la phase 9

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
18716,6	-37112	9075,3

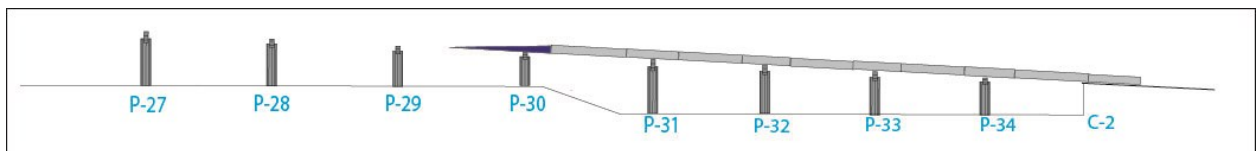
❖ Phase 10

Figure II.16: Schéma de la phase 10

Tableau II.17: Les sollicitations maximales de la phase 10

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
26610,3	-36590,3	9500,3

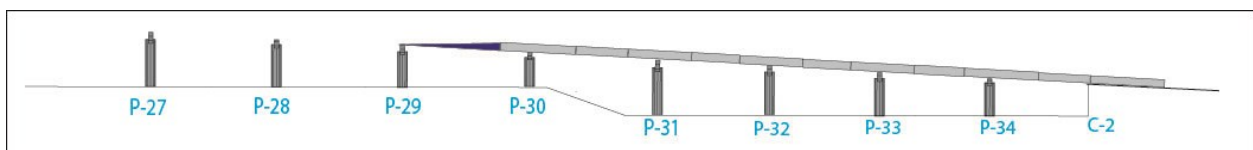
❖ Phase 11

Figure II.17 : Schéma de la phase 11

Tableau II.18: Les sollicitations maximales de la phase 11

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
19158,8	-45611,4	9719,9

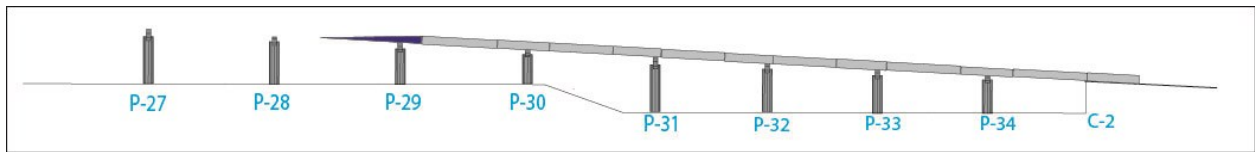
❖ Phase 12

Figure II.18: Schéma de la phase 12

Tableau II.19: Les sollicitations maximales de la phase 12

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
37961,2	-45744,7	10510

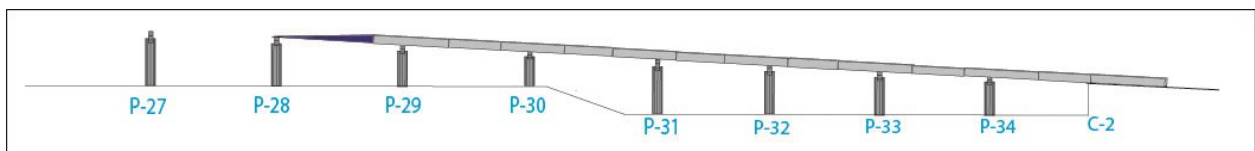
❖ Phase 13

Figure II.19: Schéma de la phase 13

Tableau II.20: Les sollicitations maximales de la phase 13

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
23641,2	-43053	9456,6

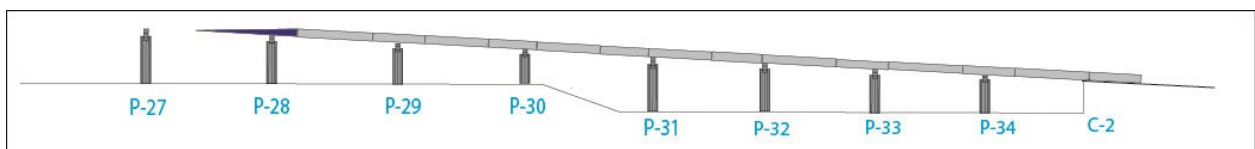
❖ Phase 14

Figure II.20: Schéma de la phase 14

Tableau II.21: Les sollicitations maximales de la phase 14

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
32924,1	-50515,8	11010

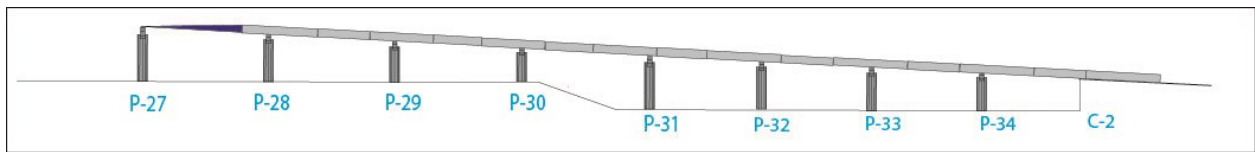
❖ Phase 15

Figure II.21: Schéma de la phase 15

Tableau II.22: Les sollicitations maximales de la phase 15

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
25611,6	-44192,4	10362

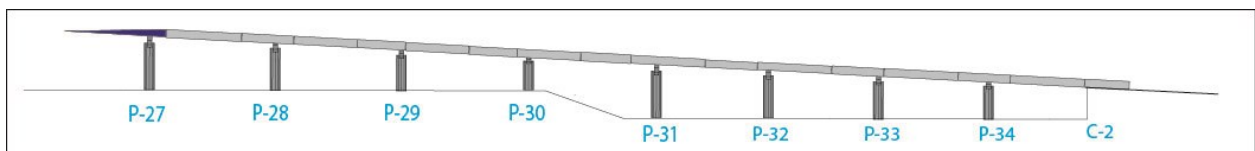
❖ Phase 16

Figure II.22: Schéma de la phase 1

Tableau II.23: Les sollicitations maximales de la phase 16

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
29225,6	-49200,1	10699

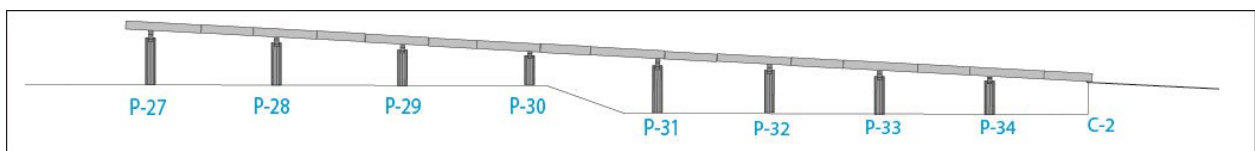
❖ Phase 17

Figure II.23: Schéma de la phase 15

Tableau II.24: Les sollicitations maximales de la phase 15

$M_{\max}$ en travée (kN.m)	$M_{\max}$ sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
36641,1	-49610,1	10972

Tableau II.25: récapitulatif des sollicitations maximales sur le poussage du tronçon 3

Phases	M _{max} en travée (kN.m)	M _{max} sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
Phase 1	0	-512,2	298,3
Phase 2	7449,1	-1607,6	2494
Phase 3	6004,3	-6600,9	4065,3
Phase 4	16983,9	-26048,7	7281,1
Phase 5	18680	-25248,6	7321,5
Phase 6	25934,1	-37291,7	9494,1
Phase 7	17415,7	-33834,3	8589,2
Phase 8	27427,3	-37655,7	9628,9
Phase 9	18716,6	-37112	9075,3
Phase 10	26610,3	-36590,3	9500,3
Phase 11	19158,8	-45611,4	9719,9
Phase 12	37961,2	-45744,7	10510
Phase 13	23641,2	-43053	9456,6
Phase 14	32924,1	-50515,8	11010
Phase 15	25611,6	-44192,4	10362
Phase 16	29225,6	-49200,1	10699
Phase 17	36641,1	-49610,1	10972

II.3.1.5.2 Poussage du tronçon 1 :

Le poussage de ce tronçon a été réalisé en 390 phases de 1 mètre, de manière similaire au tronçon 3, bien que la longueur de l'avant-bec diffère, $L_{\text{avant bec}}=36\text{m}$.

Les efforts sur les différentes phases sont résumés sur le tableau ci-dessous :

Tableau II.26: Les sollicitations maximales des phases de poussage du tronçons 1

Phases	M _{max} en travée (kN.m)	M _{max} sur Appui (kN.m)	Réaction Max (kN)
Phase 1	0	-277,5	450
Phase 2	4229	-1830	2493
Phase 3	8736,2	-8923,5	4479,9
Phase 4	13042,4	-20618,5	6744,7
Phase 5	12384,4	-21175,8	6785,1
Phase 6	13057	-23231	7466,9
Phase 7	19852,5	-25902,7	7891,1
Phase 8	13897,3	-22681,2	7314
Phase 9	14628	-23331	7413,8
Phase 10	14135,7	-22998,7	7353,1
Phase 11	14223	-34926,3	7955,8
Phase 12	36518,9	-38550	9243,5
Phase 13	21888	-42547,2	9458
Phase 14	32559	-48062	10783,6
Phase 15	22962,7	-40230,8	9568,5
Phase 16	33817,5	-44780,3	10371,7
Phase 17	22455	-40949	9708,4
Phase 18	33475,4	-45517,5	10468,5
Phase 19	22642,8	-40806,6	9676,8
Phase 20	33395,3	-45166,9	10426,6
Phase 21	22667,9	-40904,5	9685,1
Phase 22	33248,6	-45122,5	10422,7
Phase 23	22685,8	-40968,9	9681,6
Phase 24	33264,8	-45079,3	10419
Phase 25	22678,6	-40917,1	9682,8
Phase 26	33077,8	-44957,4	10405,1
Phase 27	22681,9	-40973,4	9682,1
Phase 28	33057,2	-44921,1	10401,8
Phase 29	22689,3	-41004,7	9683,4
Phase 30	32480,7	-44230,6	10333,5
Phase 31	22569,5	-47736,3	9965,2
Phase 32	37034,9	-48314,8	10734,8
Phase 33	25673	-51297,9	10730,2
Phase 34	26409,7	-45554,4	10401
Phase 35	25590,1	-45837,6	10391,2
Phase 36	25162,7	-45659,5	10359,9
Phase 37	24816,1	-45157,4	10319,2
Phase 38	24138,2	-43972	10343,3
Phase 39	24173,2	-44333,6	10406,9
Phase finale	23860,9	-47191,6	10406,9

II.3.1.6 Moments dus aux Gradient thermique :

Le gradient thermique linéaire ΔT est uniforme sur toutes les travées, le moment isostatique dû au gradient thermique vaut : (1)

$$M_{\Delta T} = \frac{EI\lambda\Delta T}{h} \quad (II.7)$$

Avec

$\lambda = 10^{-5}$ coefficient de dilatation thermique du béton

$\Delta T = 7^\circ\text{C}$

Du fait de la continuité de la poutre

$$M = M_{\Delta T} \frac{3\alpha + \sqrt{3}}{2\alpha + \sqrt{3}} \quad (II.8)$$

$\alpha = 1$

$M = 3514,75 \text{ KN.m}$

II.3.2 Calcul des sollicitations en phase de service :

Les ponts poussés présentent la particularité d'être dimensionnés à la fois pour leur phase transitoire de mise en place (poussage) et pour leur phase définitive en service.

On procédera aux calculs en phase de service, c'est-à-dire, lors de la mise en service du pont, lorsque toutes les charges d'exploitation sont appliquées afin de calculer le ferrailage actif nécessaire (la précontrainte) pour la reprise des efforts développés en exploitation. Les calculs seront effectués au moyen du logiciel CSI Bridge.

II.3.2.1 Modélisation

Quelle que soit la complexité du modèle, la modélisation pour but l'élaboration d'un modèle capable de décrire d'une manière plus au moins approchée le fonctionnement de l'ouvrage sous différentes conditions.

La modélisation d'un ouvrage comprend :

1. La définition des tracés horizontal et vertical du pont. (Profil en long et variations de hauteur)
2. La définition de la bibliothèque des matériaux utilisés (béton, acier...etc.)
3. La définition de section transversale de l'ouvrage.
4. La définition des voies : nombre et la largeur des voies.
5. La définition des conditions d'appuis.
6. La définition de la structure finale du pont.
7. La définition des cas de charge et des combinaisons de calcul.
8. Le lancement des calculs.
9. L'interprétation des résultats.

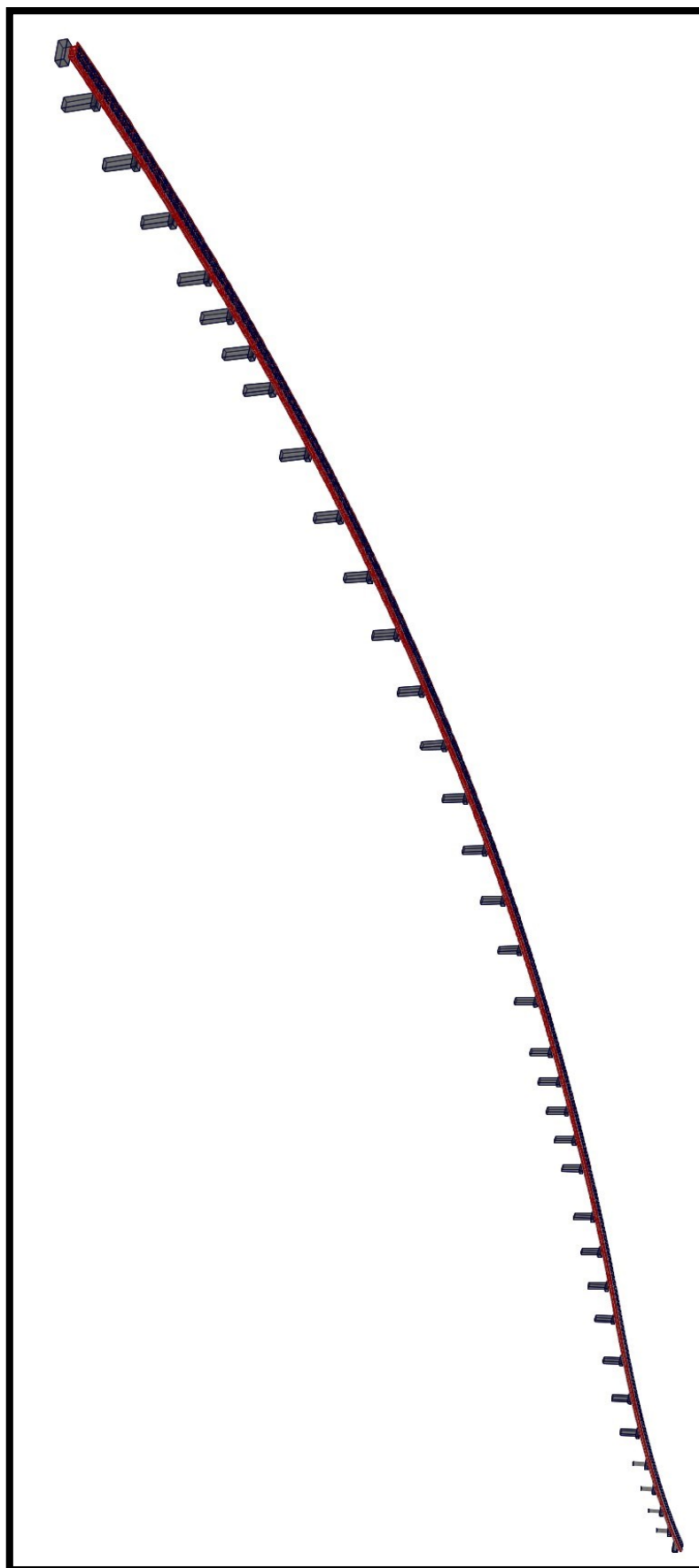


Figure II.24: Vue en 3D de l'ouvrage sur le logiciel CSi Bridge

II.3.2.2 Résultats de calculs

Les résultats obtenus sont donnés ci-dessous sous forme de diagrammes représentant les moments de flexion, les efforts tranchants. Nous considérons les efforts obtenus sous charges permanentes et pour les combinaisons défavorables à l'état limite de service (ELS) et à l'état limite ultime (ELU).

II.3.2.2.1 Moments de flexion :

Les diagrammes du moment fléchissant sous les combinaisons les plus défavorables sont illustrés dans les figures ci-dessous

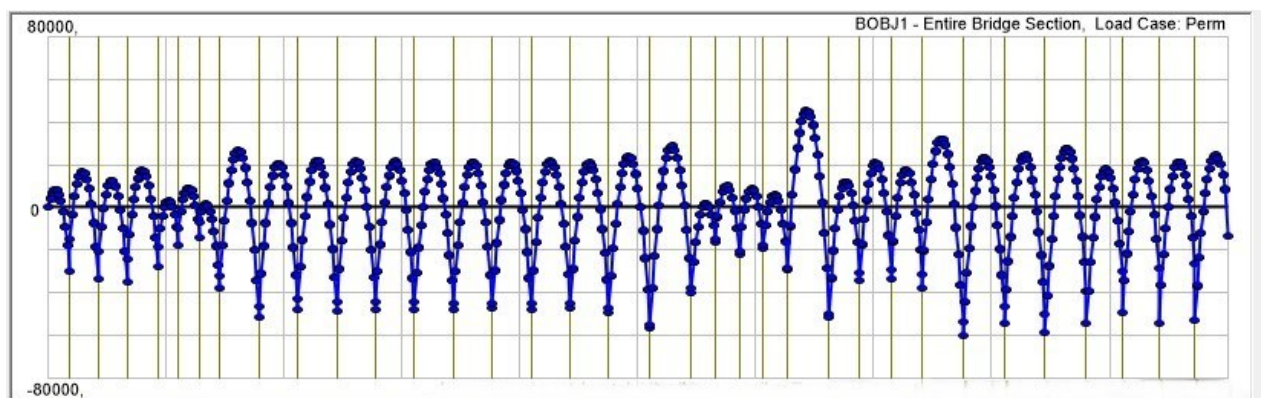


Figure II.25: Diagramme du moment fléchissant sous charges permanentes

Max = 45187,93 KN.m

Min = -60121 KN.m

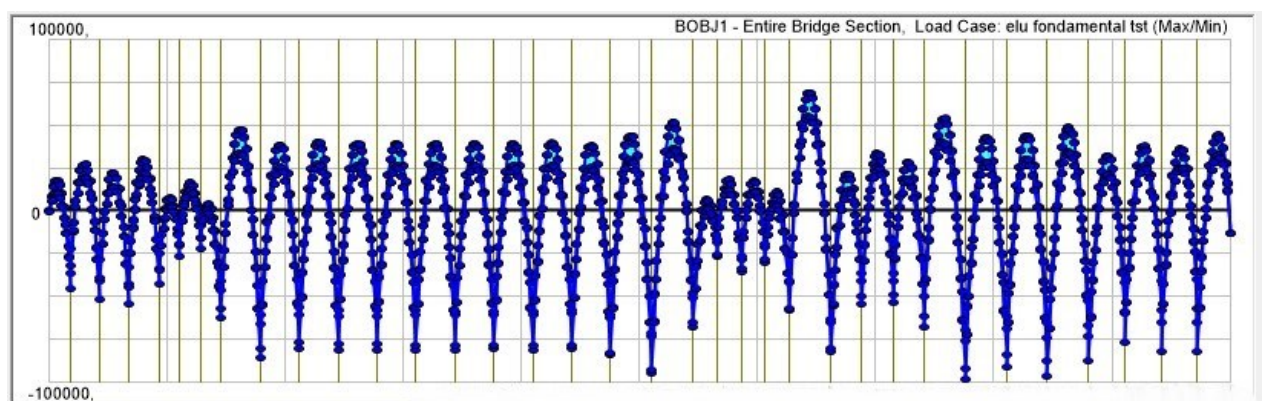


Figure II.26: Diagramme du moment fléchissant sous combinaison E.L.U défavorable
(E.L.U Fondamental)

Max = 68364,74 KN.m

Min = -98275 KN.m

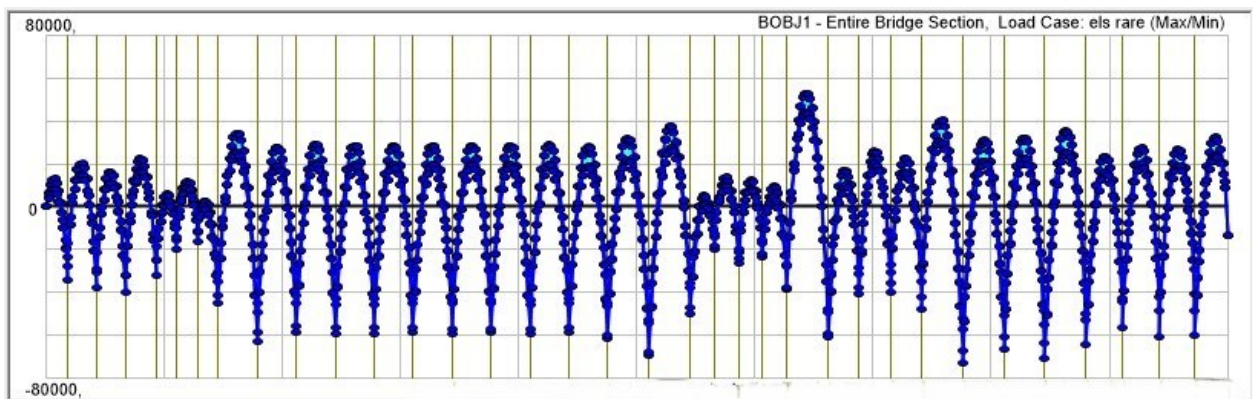


Figure II.27: Diagramme du moment fléchissant sous combinaison E.L.S défavorable
(E.L.S Rare)

Max = 53008,76 KN.m

Min = -72611,9 KN.m

II.3.2.2.2 Effort tranchant :

Les diagrammes d'effort tranchant sous les combinaisons les plus défavorables sont illustrés dans les figures ci-dessous

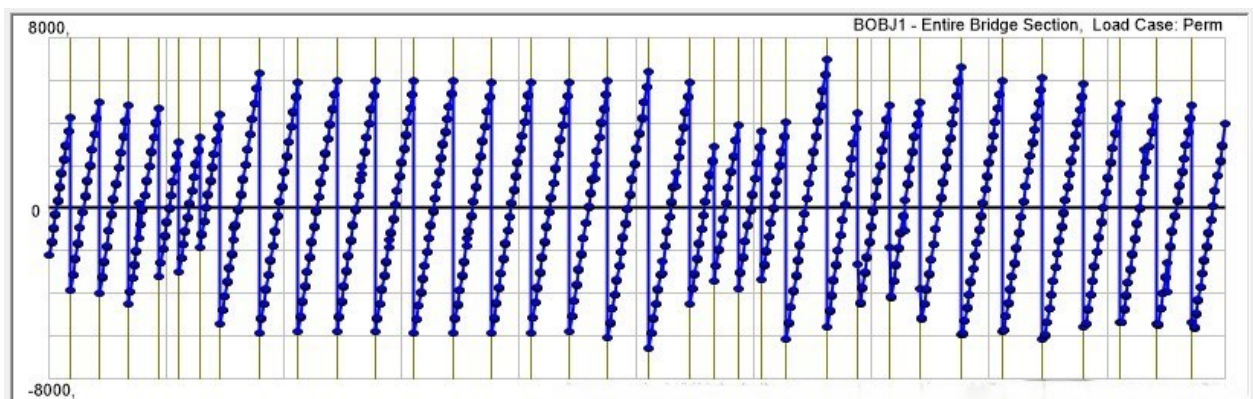


Figure II.28: Diagrammes des efforts tranchants sous charges permanente

Max = 6974,89 KN

Min = -6539,61 KN

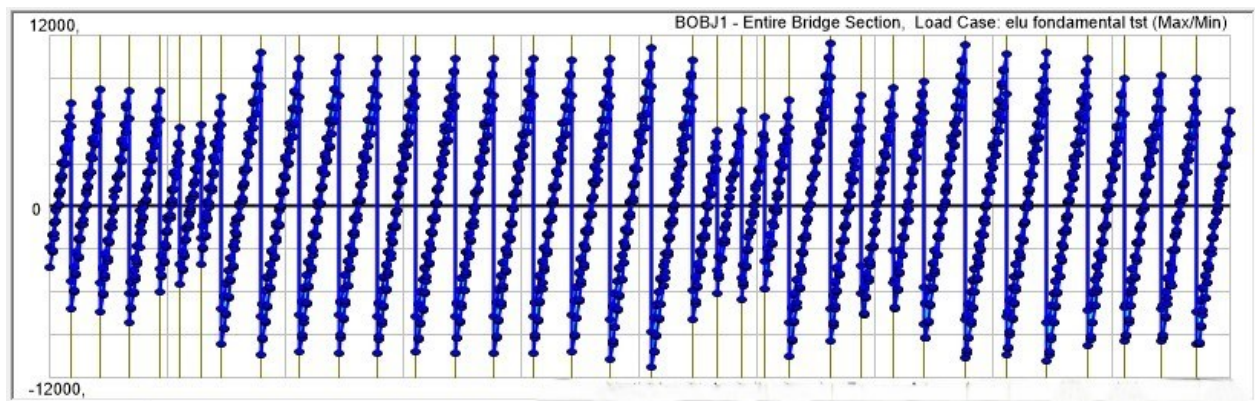


Figure II.29: Diagramme des efforts tranchant sous combinaison E.L.U défavorable
(E.L.U Fondamental)

Max = 11448,21 KN

Min = -11274,24 KN

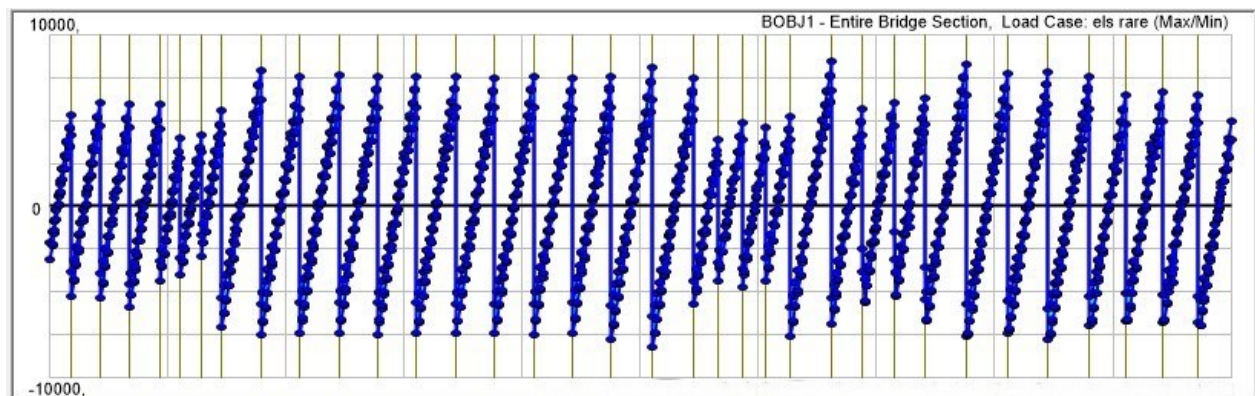


Figure II.30: Diagramme des efforts tranchant sous combinaison E.L.S défavorable
(E.L.S Rare)

Max = 8429,73 KN

Min = -8191,96 KN

II.4 Conclusion :

À travers ce chapitre, nous avons identifié les différentes actions agissant sur le tablier, ainsi que les combinaisons de charges à considérer pour le calcul des sollicitations auxquelles le pont est soumis.

CHAPITRE III

ETUDE DE LA PRECONTRAINTE

III.1 INTRODUCTION

Le béton précontraint est un matériau de construction utilisé pour créer des contraintes de compression permanentes qui contrebalancent les efforts de traction induits par les charges d'exploitation. Cette technique permet d'augmenter significativement les longueurs de travée d'un pont tout en réduisant les fissurations et les déformations, offrant une meilleure durabilité et une optimisation des sections transversales par rapport au béton armé classique. L'utilisation du béton précontraint dans les ponts constitue ainsi une solution technique et économique performante, particulièrement adaptée aux ouvrages de moyenne et grande portée soumis à des sollicitations importantes.

La précontrainte peut être appliquée au béton de deux manières différentes par pré-tension ou par post-tension des armatures. Dans ce projet la Précontrainte par post-tension est utilisée où les gaines contenant les câbles sont placées dans le béton, puis les câbles sont tendus après durcissement et ancrés aux extrémités.

III.2 CONCEPTION DU CABLAGE DE PRECONTRAINT

La précontrainte longitudinale dans le pont est conçue pour assurer la stabilité du tablier durant toutes les phases du projet. Pendant la construction, la précontrainte de poussage compense les efforts variables induits par le processus de poussage, positionnés d'une manière à s'adapter aux efforts alternés auxquels sont soumis les voussoirs successifs. Une fois le tablier positionné définitivement, la précontrainte de service est mise en place pour reprendre les charges d'exploitation

III.2.1 Précontrainte de poussage :

La précontrainte de poussage est mise en œuvre au fur et à mesure de la construction des différents tronçons. Elle est dimensionnée pour reprendre les efforts dus au poids propre du tablier, les efforts alternés du fait que chaque section passe alternativement en travée et sur appui.

Chaque section étant soumise successivement à des efforts alternés (moment positif sur les travées et négatifs sur les appuis), la précontrainte de poussage doit présenter une résultante aussi proche que possible de la fibre moyenne du tablier appelé précontrainte centrée.

Cela veut dire que le centre de gravité de tous les câbles doit coïncider avec le centre de gravité de la section en béton

L'obtention d'une précontrainte centrée est faite à l'aide d'un câblage rectilignes

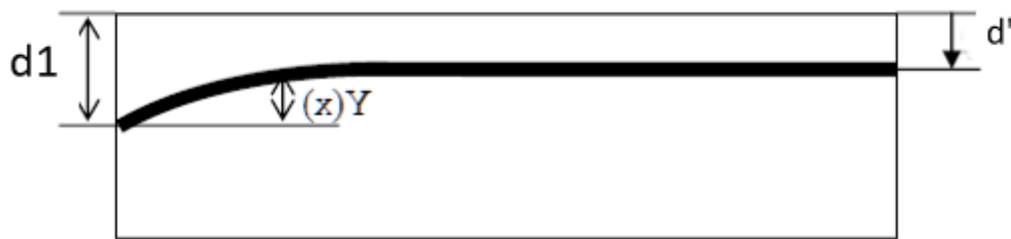
III.2.1.1 Câblage rectiligne

On a opté pour un câblage rectiligne, pour obtenir une précontrainte centrée qui est constitué de câbles droits situés dans les hourdis supérieur et inférieur, à l'intérieur de béton, il comporte parfois des câbles situés dans les âmes.

Où les câbles supérieurs travailleront lors du passage de la section au-dessus d'un appui et les câbles inférieures au milieu de la travée

Les câbles sont perdus (définitifs) après la fin du processus de poussage, et participent à la résistance de tablier en phase de service.

III.2.1.2 Détermination du tracé des câbles (7):



Les câbles de précontrainte de poussage sont disposés dans le hourdis supérieur et inférieur suivant un tracée rectiligne en élévation, puis subissent une déviation parabolique en descendant où ils seront ancrés.

Figure III.1: Tracé d'un câble en élévation

L'équation de la courbe est :

$$Y(x) = d' + (d_1 - d') \left(\frac{x}{l}\right)^2 \quad (III.1)$$

L'équation du rayon de courbure : $R(x) = \frac{x^2}{2(d_1 - d')} \geq 6m$

Le rayon de la courbure minimal d'un câble 12T15 est de 6m

Donc $x \geq \sqrt{12(d_1 - d')}$

Distance d'enrobage minimale d' :

$d' = 0.5 \phi \text{ gaine} + d \text{ (enrobage)} + \phi \text{ acier passive}$

Avec $d = \max [0,5 (\phi) \text{ gaine} ; 4 \text{ cm}]$

$(\phi) \text{ gaine } 12T15 = 8.5\text{cm}$

$\rightarrow d = \max [4,25 ; 4 \text{ cm}] = 4,25$

$\rightarrow d' = 0.5 \times 8,5 + 4,25 + 2,5 = 11\text{cm}$

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

La tangente au point d'ancrage :

$$\tan(a) = \frac{dy}{dx} = \frac{2(d_1 - d')}{l^2} x \quad (III.2)$$

$$\text{Donc: } \alpha = \text{Arctg} \frac{2(d_1 - d^I)}{l^2} x = \text{Arctg} \frac{2(0.3 - 0.11)}{1.85^2} 1.85 = 0.3038 \text{ rad}$$

$$\alpha = 17.4^\circ$$

III.2.1.3 Calcul du nombre de câbles :

On calcule les nombres de câbles sur les différents phases de poussages, et on prend le nombre de câbles le plus grand (le cas le plus défavorable)

Les câbles sont divisés en deux groupes, les câbles supérieurs et inférieurs pour chaque section du viaduc, vu que les sections subissent alternativement des moments positifs et négatifs.

On travaille en classe I où la section de béton est entièrement comprimée en tout point de la section.

Alors on a :

Sur les appuis :

$$\frac{P}{S} + \frac{P_{e_s} v}{I} - \frac{M v}{I} \geq 0 \quad (III.3)$$

En travées :

$$\frac{P}{S} + \frac{P_{e_i} v'}{I} - \frac{M v'}{I} \geq 0 \quad (III.4)$$

D'où l'effort de précontrainte est :

$$\text{Sur les appuis : } P \geq \frac{\frac{M v}{I}}{\frac{1}{S} + \frac{e_s v}{I}} \quad (III.5)$$

$$\text{En travées : } P \geq \frac{\frac{M v'}{I}}{\frac{1}{S} + \frac{e_i v'}{I}} \quad (III.6)$$

v : la distance du centre de gravité de la section transversale

v' : la distance du centre de gravité de la section à la fibre inférieure $v' = 2,149\text{m}$

I : le moment d'inertie longitudinal de la section.

S : section droite du voussoir.

e_s : l'excentricité du câble supérieure par rapport au centre de gravité

e_i : l'excentricité du câble inférieure par rapport au centre de gravité

M : moment fléchissant total agissant sur la section

Avec :

$$e_s = v - d' = 1,27 - 0,11 = 1,16 \text{ m}$$

$$e_i = v' - d' = 1,98 - 0,11 = 1,87 \text{ m}$$

$$M = M_g + M_d + M_t$$

M_g = Moment dû au poids propre

M_d : Moment dû aux dénivellations

M_t : Moment dû au gradient thermique

Et le nombre de câbles est donné par la formule :

$$N \geq \frac{P}{P_u} \quad (III.7)$$

P_u : précontrainte de dimensionnement

$$P_u = P_0 - \Delta P$$

Les pertes sont estimées à 25%

$$\text{Et } P_0 = \sigma_{p0} \times S_{\text{nomniale}}$$

$$P_0 = \min (0.8 f_{prg} ; 0.9 f_{peg}) \times S_{\text{nomniale}}$$

$$P_0 = \min (0.8 \times 1860 ; 0.9 \times 1674) \times 150 \text{ mm}^2$$

$$P_0 = 223.2 \text{ kN / toron}$$

La précontrainte de poussage est constituée de câble 12T15

$$\rightarrow P_0 = 2678.4 \text{ kN}$$

$$\text{Donc } P_u = P_0 - \Delta P = 0,75 P_0$$

$$P_u = 2008.8 \text{ kN}$$

III.2.1.3.1 Tronçons 1 :

Qui s'étend de la culée 1 jusqu'à approximativement 1/5 de la travée 24.

Tableau III.1: Calcul du nombre de câbles supérieur nécessaire en cours du poussage¹

	e_s (m)	V (m)	Mmax (kN.m)	P (kN)	N
Phase 1	1,16	1,27	-3792,25	1558,20	0,78
Phase 2	1,16	1,27	-5344,75	2196,11	1,09
Phase 3	1,16	1,27	-12438,25	5110,76	2,54
Phase 4	1,16	1,27	-24133,25	9916,13	4,94
Phase 5	1,16	1,27	-24690,55	10145,11	5,05
Phase 6	1,16	1,27	-26745,75	10989,58	5,47
Phase 7	1,16	1,27	-29417,45	12087,35	6,02
Phase 8	1,16	1,27	-26195,95	10763,67	5,36
Phase 9	1,16	1,27	-26845,75	11030,67	5,49
Phase 10	1,16	1,27	-26513,45	10894,13	5,42
Phase 11	1,16	1,27	-38441,05	15795,07	7,86
Phase 12	1,16	1,27	-42064,75	17284,01	8,60
Phase 13	1,16	1,27	-46061,95	18926,42	9,42
Phase 14	1,16	1,27	-51576,75	21192,40	10,55
Phase 15	1,16	1,27	-43745,55	17974,64	8,95
Phase 16	1,16	1,27	-48295,05	19843,98	9,88
Phase 17	1,16	1,27	-44463,75	18269,74	9,09
Phase 18	1,16	1,27	-49032,25	20146,89	10,03
Phase 19	1,16	1,27	-44321,35	18211,23	9,07
Phase 20	1,16	1,27	-48681,65	20002,83	9,96
Phase 21	1,16	1,27	-44419,25	18251,45	9,09
Phase 22	1,16	1,27	-48637,25	19984,59	9,95
Phase 23	1,16	1,27	-44483,65	18277,91	9,10
Phase 24	1,16	1,27	-48594,05	19966,84	9,94
Phase 25	1,16	1,27	-44431,85	18256,63	9,09
Phase 26	1,16	1,27	-48472,15	19916,75	9,91
Phase 27	1,16	1,27	-44488,15	18279,76	9,10
Phase 28	1,16	1,27	-48435,85	19901,84	9,91
Phase 29	1,16	1,27	-44519,45	18292,62	9,11
Phase 30	1,16	1,27	-47745,35	19618,12	9,77
Phase 31	1,16	1,27	-51251,05	21058,57	10,48
Phase 32	1,16	1,27	-51829,55	21296,27	10,60
Phase 33	1,16	1,27	-54812,65	22522,00	11,21
Phase 34	1,16	1,27	-49069,15	20162,05	10,04
Phase 35	1,16	1,27	-49352,35	20278,42	10,09
Phase 36	1,16	1,27	-49174,25	20205,24	10,06
Phase 37	1,16	1,27	-48672,15	19998,93	9,96
Phase 38	1,16	1,27	-47486,75	19511,86	9,71

Tableau III.2: Calcul du nombre de câbles inférieure nécessaire en cours du poussage¹

	es	V	Mmax (kN.m)	P (kN)	N
La	Phase 1	1,87	1,98	3814,75	1419,71
	Phase 2	1,87	1,98	7743,75	2881,94
	Phase 3	1,87	1,98	12250,95	4559,35
	Phase 4	1,87	1,98	16557,15	6161,96
	Phase 5	1,87	1,98	15899,15	5917,08
	Phase 6	1,87	1,98	16571,75	6167,39
	Phase 7	1,87	1,98	23367,25	8696,43
	Phase 8	1,87	1,98	17412,05	6480,12
	Phase 9	1,87	1,98	18142,75	6752,06
	Phase 10	1,87	1,98	17650,45	6568,85
	Phase 11	1,87	1,98	17737,75	6601,34
	Phase 12	1,87	1,98	40033,65	14899,05
	Phase 13	1,87	1,98	25402,75	9453,97
	Phase 14	1,87	1,98	36073,75	13425,32
	Phase 15	1,87	1,98	26477,45	9853,93
	Phase 16	1,87	1,98	37332,25	13893,69
	Phase 17	1,87	1,98	25969,75	9664,98
	Phase 18	1,87	1,98	36990,15	13766,37
	Phase 19	1,87	1,98	26157,55	9734,88
	Phase 20	1,87	1,98	36910,05	13736,56
	Phase 21	1,87	1,98	26182,65	9744,22
	Phase 22	1,87	1,98	36763,35	13681,96
	Phase 23	1,87	1,98	26200,55	9750,88
	Phase 24	1,87	1,98	36779,55	13687,99
	Phase 25	1,87	1,98	26193,35	9748,20
	Phase 26	1,87	1,98	36592,55	13618,40
	Phase 27	1,87	1,98	26196,65	9749,43
	Phase 28	1,87	1,98	36571,95	13610,73
	Phase 29	1,87	1,98	26204,05	9752,18
	Phase 30	1,87	1,98	35995,45	13396,18
	Phase 31	1,87	1,98	26084,25	9707,60
	Phase 32	1,87	1,98	40549,65	15091,09
	Phase 33	1,87	1,98	29187,75	10862,61
	Phase 34	1,87	1,98	29924,45	11136,78
	Phase 35	1,87	1,98	29104,85	10831,75
	Phase 36	1,87	1,98	28677,45	10672,69
	Phase 37	1,87	1,98	28330,85	10543,70
	Phase 38	1,87	1,98	27652,95	10291,41

Précontrainte de poussage nécessite :

- 12 câbles 12T15 droits dans l'hourdis supérieur (6 câbles de chaque côté des âmes) pour reprendre les efforts agissants sur la section à l'appui en phase de poussage.
- 8 câbles 12T15 droits dans l'hourdis inférieur (4 câbles de chaque côté des âmes) pour reprendre les efforts agissants sur la section en travée en phase de poussage.

III.2.1.3.2 Tronçons 3 :

- Qui s'étend de la culée 2 jusqu'à approximativement 1/5 de la travée 27.

Tableau III.3: Calcul du nombre de câbles supérieur nécessaire en cours du poussage²

	es (m)	V (m)	Mmax (kN.m)	P (kN)	N
Phase 1	1,16	1,27	-4026,95	1654,64	0,82
Phase 2	1,16	1,27	-5122,35	2104,73	1,05
Phase 3	1,16	1,27	-10115,65	4156,43	2,07
Phase 4	1,16	1,27	-29563,45	12147,34	6,05
Phase 5	1,16	1,27	-28763,35	11818,59	5,88
Phase 6	1,16	1,27	-40806,45	16766,99	8,35
Phase 7	1,16	1,27	-37349,05	15346,37	7,64
Phase 8	1,16	1,27	-41170,45	16916,55	8,42
Phase 9	1,16	1,27	-40626,75	16693,15	8,31
Phase 10	1,16	1,27	-40105,05	16478,79	8,20
Phase 11	1,16	1,27	-49126,15	20185,47	10,05
Phase 12	1,16	1,27	-49259,45	20240,24	10,08
Phase 13	1,16	1,27	-46567,75	19134,25	9,53
Phase 14	1,16	1,27	-54030,55	22200,65	11,05
Phase 15	1,16	1,27	-47707,15	19602,42	9,76
Phase 16	1,16	1,27	-52714,85	21660,04	10,78
Phase 17	1,16	1,27	-53124,85	21828,50	10,87

Tableau III.4: Calcul du nombre de câbles inférieure nécessaire en cours du poussage²

	es (m)	V (m)	Mmax (kN.m)	P (kN)	N
Phase 1	1,87	1,98	3789,45	1410,29	0,70
Phase 2	1,87	1,98	10963,85	4080,34	2,03
Phase 3	1,87	1,98	9519,05	3542,64	1,76
Phase 4	1,87	1,98	20498,65	7628,84	3,80
Phase 5	1,87	1,98	22194,75	8260,07	4,11
Phase 6	1,87	1,98	29448,85	10959,78	5,46
Phase 7	1,87	1,98	20930,45	7789,54	3,88
Phase 8	1,87	1,98	30942,05	11515,49	5,73
Phase 9	1,87	1,98	22231,35	8273,69	4,12
Phase 10	1,87	1,98	30125,05	11211,43	5,58
Phase 11	1,87	1,98	22673,55	8438,26	4,20
Phase 12	1,87	1,98	41475,95	15435,82	7,68
Phase 13	1,87	1,98	27155,95	10106,44	5,03
Phase 14	1,87	1,98	36438,85	13561,20	6,75
Phase 15	1,87	1,98	29126,35	10839,75	5,40
Phase 16	1,87	1,98	32740,35	12184,75	6,07
Phase 17	1,87	1,98	40155,85	14944,53	7,44

La précontrainte de poussage nécessitera

- 12 câbles 12T15 droits dans l'hourdis supérieur (6 câbles de chaque côté des âmes) pour reprendre les efforts agissants sur la section à l'appui en phase de poussage.
- 8 câbles 12T15 droits dans l'hourdis inférieur (4 câbles de chaque côté des âmes) pour reprendre les efforts agissants sur la section en travée en phase de poussage.

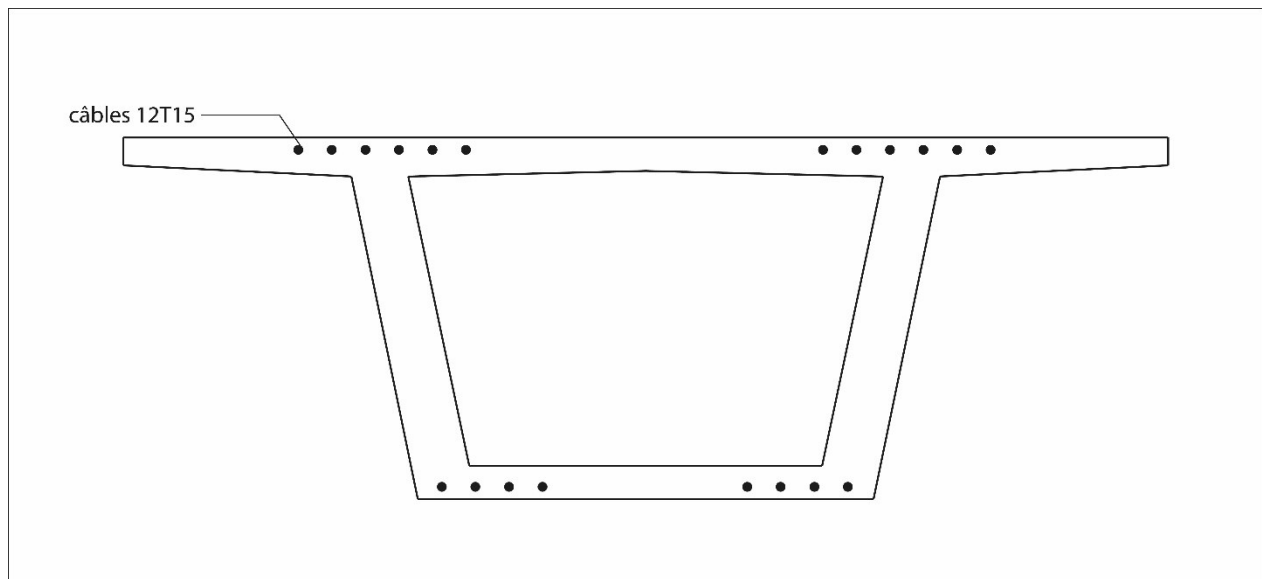


Figure III.2 : disposition des câbles de précontraintes de poussages pour les tronçons 1 et 3 sur la section du caisson

III.2.1.4 Vérification des contraintes en phase de poussage (8) :

La vérification des contraintes se fera pour chaque phase poussage sur les sections dangereuses (appui et à mi- travée).

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

Sur les appuis :

$$\sigma_{sup} = \frac{P_1 e_s v}{I} - \frac{P_2 e_i v}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} - \frac{Mv}{I} \geq 0 \quad (III.8)$$

$$\sigma_{inf} = -\frac{P_1 e_s v'}{I} + \frac{P_2 e_i v'}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} + \frac{Mv'}{I} \leq 0.6 f_{c28} \quad (III.9)$$

À mi travée :

$$\sigma_{sup} = -\frac{P_1 e_s v}{I} + \frac{P_2 e_i v}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} + \frac{Mv}{I} \leq 0.6 f_{c28} \quad (III.10)$$

$$\sigma_{inf} = \frac{P_1 e_s v'}{I} - \frac{P_2 e_i v'}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} - \frac{Mv'}{I} \geq 0 \quad (III.11)$$

Avec :

P_1 : L'effort de précontrainte engendré par les câbles à l'intérieur de l'hourdis supérieure.

E_s : L'excentricité des câbles à l'intérieur de l'hourdis supérieure par rapport au centre de gravité

P_2 : L'effort de précontrainte engendré par les câbles à l'intérieur de l'hourdis inferieure.

e_i : L'excentricité des câbles à l'intérieur de l'hourdis inferieure par rapport au centre de gravité

M : Moment agissant sur la section en cours de poussage

Tableau III.5 : Vérifications des contraintes supérieures et inférieures sur les appuis et en travées, lors des phases de poussage du tronçon 1

					Travée		Appuie	
	P1 (kN)	P2 (kN)	Mmax (kN.m)	Mmin (kN.m)	σ_{sup} (Mpa)	σ_{inf} (Mpa)	σ_{sup} (Mpa)	σ_{inf} (Mpa)
Phase 1	24105,6	16070,4	3814,75	-3792,25	6,11	6,73	5,91	6,97
Phase 2	24105,6	16070,4	7743,75	-5344,75	7,04	6,02	5,73	7,25
Phase 3	24105,6	16070,4	12250,95	-12438,25	7,56	5,21	4,91	8,52
Phase 4	24105,6	16070,4	16557,15	-24133,25	8,06	4,44	3,56	10,63
Phase 5	24105,6	16070,4	15899,15	-24690,55	7,99	4,55	3,50	10,73
Phase 6	24105,6	16070,4	16571,75	-26745,75	8,06	4,43	3,26	11,10
Phase 7	24105,6	16070,4	23367,25	-29417,45	8,85	3,21	2,95	11,58
Phase 8	24105,6	16070,4	17412,05	-26195,95	8,16	4,28	3,33	11,00
Phase 9	24105,6	16070,4	18142,75	-26845,75	8,24	4,15	3,25	11,12
Phase 10	24105,6	16070,4	17650,45	-26513,45	8,19	4,24	3,29	11,06
Phase 11	24105,6	16070,4	17737,75	-38441,05	8,20	4,22	1,91	13,20
Phase 12	24105,6	16070,4	40033,65	-42064,75	10,77	0,21	1,49	13,86
Phase 13	24105,6	16070,4	25402,75	-46061,95	9,08	2,84	1,03	14,58
Phase 14	24105,6	16070,4	36073,75	-51576,75	10,31	0,92	0,40	15,57
Phase 15	24105,6	16070,4	26477,45	-43745,55	9,21	2,65	1,30	14,16
Phase 16	24105,6	16070,4	37332,25	-48295,05	10,46	0,70	0,77	14,98
Phase 17	24105,6	16070,4	25969,75	-44463,75	9,15	2,74	1,22	14,29
Phase 18	24105,6	16070,4	36990,15	-49032,25	10,42	0,76	0,69	15,11
Phase 19	24105,6	16070,4	26157,55	-44321,35	9,17	2,71	1,23	14,26
Phase 20	24105,6	16070,4	36910,05	-48681,65	10,41	0,77	0,73	15,05
Phase 21	24105,6	16070,4	26182,65	-44419,25	9,17	2,70	1,22	14,28
Phase 22	24105,6	16070,4	36763,35	-48637,25	10,39	0,80	0,73	15,04
Phase 23	24105,6	16070,4	26200,55	-44483,65	9,17	2,70	1,21	14,29
Phase 24	24105,6	16070,4	36779,55	-48594,05	10,40	0,80	0,74	15,03
Phase 25	24105,6	16070,4	26193,35	-44431,85	9,17	2,70	1,22	14,28
Phase 26	24105,6	16070,4	36592,55	-48472,15	10,37	0,83	0,75	15,01
Phase 27	24105,6	16070,4	26196,65	-44488,15	9,17	2,70	1,21	14,29
Phase 28	24105,6	16070,4	36571,95	-48435,85	10,37	0,83	0,76	15,00
Phase 29	24105,6	16070,4	26204,05	-44519,45	9,17	2,70	1,21	14,30
Phase 30	24105,6	16070,4	35995,45	-47745,35	10,31	0,94	0,84	14,88
Phase 31	24105,6	16070,4	26084,25	-51251,05	9,16	2,72	0,43	15,51
Phase 32	24105,6	16070,4	40549,65	-51829,55	10,83	0,12	0,37	15,61
Phase 33	24105,6	16070,4	29187,75	-54812,65	9,52	2,16	0,02	16,15
Phase 34	24105,6	16070,4	29924,45	-49069,15	9,60	2,03	0,68	15,12
Phase 35	24105,6	16070,4	29104,85	-49352,35	9,51	2,18	0,65	15,17
Phase 36	24105,6	16070,4	28677,45	-49174,25	9,46	2,25	0,67	15,14
Phase 37	24105,6	16070,4	28330,85	-48672,15	9,42	2,32	0,73	15,05
Phase 38	24105,6	16070,4	27652,95	-47486,75	9,34	2,44	0,87	14,83

Tableau III.5: Vérifications des contraintes supérieures et inférieures sur les appuis et en travées, lors des phases de poussage du tronçon 3

					Travée		Appuie	
	P1 (kN)	P2 (kN)	Mmax kN.m	Mmin kN.m	σ_{sup} (Mpa)	σ_{inf} (Mpa)	σ_{sup} (Mpa)	σ_{inf} (Mpa)
Phase 1	24105,6	16070,4	3789,45	-4026,95	6,10	6,82	5,80	7,01
Phase 2	24105,6	16070,4	10963,85	-5122,35	6,93	5,53	5,68	7,21
Phase 3	24105,6	16070,4	9519,05	-10115,65	6,77	5,79	5,10	8,11
Phase 4	24105,6	16070,4	20498,65	-29563,45	8,03	3,82	2,86	11,61
Phase 5	24105,6	16070,4	22194,75	-28763,35	8,23	3,51	2,95	11,46
Phase 6	24105,6	16070,4	29448,85	-40806,45	9,07	2,21	1,56	13,63
Phase 7	24105,6	16070,4	20930,45	-37349,05	8,08	3,74	1,96	13,01
Phase 8	24105,6	16070,4	30942,05	-41170,45	9,24	1,94	1,52	13,69
Phase 9	24105,6	16070,4	22231,35	-40626,75	8,23	3,50	1,58	13,60
Phase 10	24105,6	16070,4	30125,05	-40105,05	9,15	2,08	1,64	13,50
Phase 11	24105,6	16070,4	22673,55	-49126,15	8,28	3,43	0,60	15,13
Phase 12	24105,6	16070,4	41475,95	-49259,45	10,46	0,04	0,58	15,15
Phase 13	24105,6	16070,4	27155,95	-46567,75	8,80	2,62	0,89	14,67
Phase 14	24105,6	16070,4	36438,85	-54030,55	9,87	0,95	0,03	16,01
Phase 15	24105,6	16070,4	29126,35	-47707,15	9,03	2,26	0,76	14,87
Phase 16	24105,6	16070,4	32740,35	-52714,85	9,45	1,61	0,18	15,77
Phase 17	24105,6	16070,4	40155,85	-53124,85	10,30	0,28	0,14	15,85

III.2.2 Précontrainte de Service (continuité) :

Après la phase de poussage du viaduc, une précontrainte complémentaire doit être mise en place pour reprendre les sollicitations dues au trafic.

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, les câbles extérieurs passent en dessous du l'hourdi supérieures du caisson au niveau des piles et en dessus du l'hourdis inférieures sur les travées

Ce qui donne un tracé trapézoïdal. Ce tracé est maintenu à l'aide de pièces de déviation, deux entretoises déviateurs au quart de la travée.

Remarque :

Le tronçon de transition coulés sur place qui s'étend de la travée 24 jusqu'à la travée 27 ayant pas de gaines de précontrainte noyées dans le béton, Le câblage extérieur est destiné à reprendre toutes les sollicitations agissant sur cette partie du viaduc

III.2.2.1 Détermination du tracé des câbles :

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

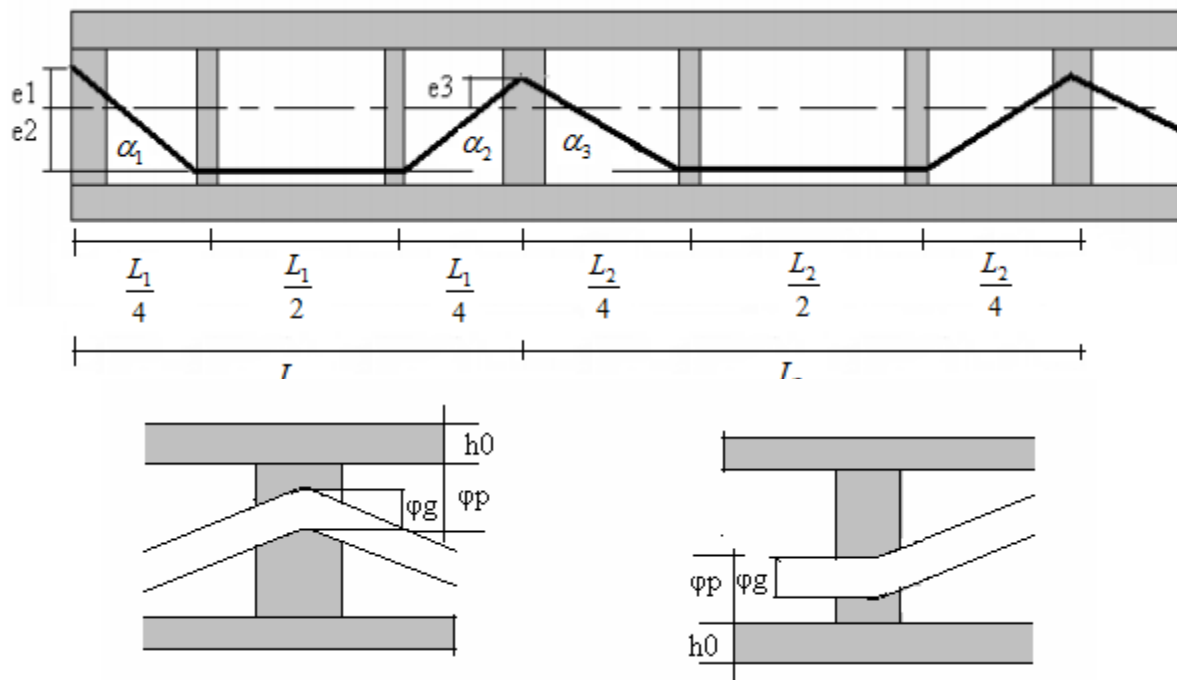


Figure III.3: Tracé des câbles

$$e_1 \leq \rho v = \frac{I}{sv'} = 0,816 \text{ m}$$

Pour des câbles formés de 12 torons

$$e_2 = v' - h_0 - \phi_p + \phi_g / 2 = 1,27 - 0,25 - 0,2 + 0,085 / 2 = 1,487 \text{ m}$$

$$e_3 = v - h_0 - \phi_p + \phi_g / 2 = 1,98 - 0,25 - 0,2 + 0,085 / 2 = 0,777 \text{ m}$$

Pour des câbles formés de 22 torons

$$e_2 = v' - h_0 - \phi_p + \phi_g / 2 = 1,27 - 0,25 - 0,2 + 0,105 / 2 = 1,477 \text{ m}$$

$$e_3 = v - h_0 - \phi_p + \phi_g / 2 = 1,98 - 0,25 - 0,2 + 0,105 / 2 = 0,767 \text{ m}$$

$$Tga_1 = \frac{e_1 + e_2}{L1/4}$$

$$Tga_2 = \frac{e_2 + e_3}{L1/4}$$

$$Tga_3 = \frac{e_2 + e_3}{L2/4}$$

III.2.2.2 Calcul du nombre de câbles :

Les câbles sont destinés à reprendre une partie des charges, les câbles sont 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.

III.2.2.2.1 Les tronçons 1 et 3 :

- Des câbles de 12 torons de 150 mm² seront utilisées

On a :

Sur les appuis :

$$\frac{P}{S} + \frac{P_{eS}v}{I} - \frac{M v}{I} \geq 0 \quad (III. 13)$$

En travées :

$$\frac{P}{S} + \frac{P_{ei}v'}{I} - \frac{M V'}{I} \geq 0 \quad (III. 14)$$

Avec :

$$M = M_{SER} - M_P + M_{pr}$$

M : Moment maximal fléchissant agissant sur la section.

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

M_P : Moment maximal total en phase de poussage.

M_{pr} : Moment dû à l'effet de la précontrainte engendré par l'ensemble des câbles extérieurs

$$M_{pr} = N \times m_{pr}$$

m_{pr} : Moment dû à l'effet de la précontrainte engendré par un seul câbles

P : effort de précontrainte.

v : la distance du centre de gravité de la section à la fibre supérieur v= 1,351m

v' : la distance du centre de gravité de la section à la fibre inférieur v'=2,149m

I : le moment d'inertie longitudinal de la section.

S : section droite du voussoir.

e_s : l'excentricité du câble aux appuis par rapport au centre de gravité.

$$e_s = e_3 = 0,777 \text{ m}$$

e_i : l'excentricité du câble en travées par rapport au centre de gravité

$$e_i = e_2 = 1,487 \text{ m}$$

Le nombre de câbles est donné par la relation : $N \geq \frac{P}{P_u}$

Donc :

$$\text{Sur les appuis : } \frac{NP_u}{s} + \frac{NP_ue_s v}{I} - \frac{M_{ser} v}{I} + \frac{M_p v}{I} + \frac{Nm_{pr} v}{I} \geq 0 \quad (III.15)$$

$$N \geq \frac{\frac{M_{ser} v}{I} - \frac{M_p v}{I}}{\frac{P_u}{s} + \frac{P_ue_s v}{I} + \frac{m_{pr} v}{I}} \quad (III.16)$$

$$\text{En travées : } \frac{NP_u}{s} + \frac{NP_ue_i v'}{I} - \frac{M_{ser} v'}{I} + \frac{M_p v'}{I} + \frac{Nm_{pr} v'}{I} \geq 0 \quad (III.17)$$

$$N \geq \frac{\frac{M_{ser} v'}{I} - \frac{M_p v'}{I}}{\frac{P_u}{s} + \frac{P_ue_i v'}{I} + \frac{m_{pr} v'}{I}} \quad (III.18)$$

Tableau III.6: Calcul du nombre de câbles de continuité pour les tronçons poussés (1 et 3)

Section	V (m)	e (m)	I (m ⁴)	Pu (kN)	M (kN.m)	N	Nbr de câble
Appuis	1,27	0,777	11	2008,8	39084,54	7,59886415	8
Travée	1,98	1,487	11	2008,8	22165,20	3,1314193	4

8 Câbles de continuité extérieures de 12T15 (4 câbles de chaque côté des âmes) sont nécessaires pour reprendre les sollicitations agissantes sur le tablier en phase de service pour les deux tronçons poussés

III.2.2.2.2 Tronçon 2

Le câblage extérieur est destiné à reprendre toutes les sollicitations agissant sur cette partie du viaduc. Des câbles de 27 torons de 150 mm² seront utilisées.

Le moment maximal fléchissant agissant sur la section est égale à :

$$M = M_{SER} + M_{pr}$$

Le nombre de câbles est calculé de la même manière :

Tableau III.7: Calcul du nombre de câbles de continuité pour les tronçons 2

Section	V (m)	e (m)	I (m ⁴)	Pu (kN)	M (kN.m)	N	Nbr de câble
Appui	1,27	0,777	9,766	4519,8	85240,26	7,38	8
Travée	1,98	1,487	9,766	4519,8	73869,84	4,83	6

8 Câbles de continuité extérieures de 27T15 (4 câbles de chaque côté des âmes) sont nécessaires pour reprendre toutes les sollicitations agissantes sur le tablier

III.2.2.3 Vérification des contraintes en phase de service

La vérification des contraintes se fera pour les sections dangereuses (appui et à mi- travée).

Pour les deux tronçons poussés :

Sur les appuie :

$$\sigma_{\text{sup}} = \frac{P_1 e_1 v}{I} - \frac{P_2 e_2 v}{I} + \frac{P_3 e_3 v}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} + \frac{P_3}{S} + \frac{M_{pr} v}{I} - \frac{M_{ser} v}{I} \geq 0 \quad (III. 19)$$

$$\sigma_{\text{inf}} = -\frac{P_1 e_1 v'}{I} + \frac{P_2 e_2 v'}{I} - \frac{P_3 e_3 v'}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} + \frac{P_3}{S} - \frac{M_{pr} v'}{I} + \frac{M_{ser} v'}{I} \leq 0.6 f_{c28} \quad (III. 20)$$

À mi travée :

$$\sigma_{\text{sup}} = -\frac{P_1 e_1 v}{I} + \frac{P_2 e_2 v}{I} - \frac{P_3 e_3 v}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} + \frac{P_3}{S} - \frac{M_{pr} v}{I} + \frac{M_{ser} v}{I} \leq 0.6 f_{c28} \quad (III. 21)$$

$$\sigma_{\text{inf}} = \frac{P_1 e_1 v'}{I} - \frac{P_2 e_2 v'}{I} + \frac{P_3 e_3 v'}{I} + \frac{P_1}{S} + \frac{P_2}{S} + \frac{P_3}{S} + \frac{M_{pr} v'}{I} - \frac{M_{ser} v'}{I} \geq 0 \quad (III. 22)$$

Avec :

P_1 : L'effort de précontrainte engendré par les câbles de poussage à l'intérieur de l'hourdis supérieure.

e_1 : L'excentricité des câbles de poussage à l'intérieur de l'hourdis supérieure par rapport au centre de gravité

P_2 : L'effort de précontrainte engendré par les câbles de poussage à l'intérieur de l'hourdis inférieure.

e_2 : L'excentricité des câbles de poussage à l'intérieur de l'hourdis inférieure par rapport au centre de gravité

P_3 : L'effort de précontrainte engendré par les câbles extérieurs (câbles de continuité).

e_3 : L'excentricité des câbles extérieurs par rapport au centre de gravité

v : la distance du centre de gravité de la section à la fibre supérieur

v' : la distance du centre de gravité de la section à la fibre inférieur

M_{pr} : Moment dû à l'effet de la précontrainte engendré par l'ensemble des câbles extérieurs.

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

Tableau III.8: Vérification des contraintes Supérieures et inférieures en phase de service pour les tronçons poussés

	Appui	Mi travée
e_1 (m)	1,16	
P_1 (m)	24105,6	
e_2 (m)	1,87	
P_2 (m)	16070,4	
e_3 (m)	0,7775	1,4875
P_3 (m)	16070,4	16070,4
M_{ser} (kN.m)	-87251,5	56376,66
M_{pr} (Mpa)	11545,16	19437,14
σ_{sup} (Mpa)	$0,915 \geq 0$	$9,019 \leq 0.6 f_{c28}$
σ_{inf} (Mpa)	$15,62 \leq 0.6 f_{c28}$	$7,52 \geq 0$

Pour le tronçon de transition :

Sur les appuis :

$$\sigma_{sup} = \frac{P_3 e_2 v}{I} + \frac{P_3}{S} + \frac{M_{pr} v}{I} - \frac{M_{ser} v}{I} \geq 0 \quad (III. 23)$$

$$\sigma_{inf} = -\frac{P_3 e_2 v'}{I} + \frac{P_3}{S} - \frac{M_{pr} v}{I} + \frac{M_{ser} v}{I} \leq 0.6 f_{c28} \quad (III. 24)$$

À mi travée :

$$\sigma_{sup} = -\frac{P_3 e_3 v}{I} + \frac{P_3}{S} - \frac{M_{pr} v}{I} + \frac{M_{ser} v}{I} \leq 0.6 f_{c28} \quad (III. 25)$$

$$\sigma_{inf} = \frac{P_3 e_3 v'}{I} + \frac{P_3}{S} + \frac{M_{pr} v}{I} - \frac{M_{ser} v}{I} \geq 0 \quad (III. 26)$$

Tableau III.9: Vérification des contraintes Supérieures et inférieures en phase de service pour le tronçon de transition

	Appui	Mi travée
e_3 (m)	0,7775	1,4875
P_3 (m)	36158,4	36158,4
M_{ser} (kN.m)	-81993,19	68403,14
M_{pr} (Mpa)	29541,17	53785,62
σ_{sup} (Mpa)	$2,5 \geq 0$	$9,83 \leq 0.6 f_{c28}$
σ_{inf} (Mpa)	$9,69 \leq 0.6 f_{c28}$	$0,79 \geq 0$

III.2.2.4 Répartition de la précontrainte de continuité :

La précontrainte extérieure se répartie comme suit :

Tronçons 1 et 3 :

8 Câbles extérieurs de 12T15, tendus d'entretoise à l'entretoise suivant un tracé trapézoïdal.

Tronçon 2 :

8 Câbles extérieurs de 27T15, tendus d'entretoise à l'entretoise suivant un tracé trapézoïdal

III.3 Calculs Des pertes de précontraintes :

Les pertes de précontrainte représentent la réduction progressive de la force initiale appliquée par les vérins aux câbles lors de sa mise en tension, au fil du temps ou immédiatement après la mise en tension. Affectant l'efficacité à long terme de la précontrainte.

Les pertes de précontrainte peuvent être rangées sous deux catégories :

- Les pertes de tension instantanées
- Pertes de tension différées

III.3.1 Calcul des pertes pour la précontrainte de continuité

III.3.1.1 Calcul des pertes instantanées

Elles se produisent lors de la mise en tension des câbles de précontrainte.

On a : -les pertes de tension par frottement ;
 - les pertes de tension par recul de l'ancrage ;
 - les pertes de tension par déformations instantanées du béton.

III.3.1.1.1 Pertes par frottement (8) :

Ces pertes se produisent par frottement du câble dans la gaine lors de la mise en tension du câble, dans les zones où le câble rentre au contact de la gaine et plus particulièrement, dans les parties courbes et aux points où le tracé du câble présente des irrégularités. Dans ce cas, l'action tangentielle de contact du conduit sur les armatures s'oppose au sens de déplacement du câble suite à sa mise en tension

La valeur de la tension après la perte à l'abscisse x est donnée par la relation :

$$\sigma_p(x) = \sigma_{p0} e^{(f\alpha + \varphi x)} \quad (III. 27)$$

Et la perte de tension par frottement est estimée par la formule :

$$\Delta\sigma_{fro} = \sigma_{p0} (1 - e^{(f\alpha + \varphi x)}) \quad (III. 28)$$

Avec :

σ_{p0} : tension à l'origine

f : coefficient de frottement du câble

φ : coefficients de frottement en ligne

α : $\sum$ des déviation angulaire arithmétique du câble à x (en rd)

On a:

$\sigma_{p0} = 1488 \text{ Mpa}$

f = 0.2

$\varphi = 0$

Tableau III.10: les pertes dues au frottement pour la précontrainte de continuité

Section	X(m)	α_i (rd)	$\Sigma \alpha_i$	f(rd ⁻¹)	$\Delta\sigma_{fro}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{fro}/\sigma_{p0}$ (%)
Culée 1	0	0,335	0,335	0,2	96,358	3,598
Déviateur1	8,833	0,335	0,669	0,2	186,477	6,962
Déviateur2	19,875	0,329	0,999	0,2	269,465	10,061
Appui 1	26,5	0,329	1,328	0,2	347,161	12,962
Appui 1	26,5	0,247	0,247	0,2	71,593	2,673
Déviateur1	35,5	0,247	0,493	0,2	139,741	5,217
Déviateur2	53,5	0,247	0,740	0,2	204,610	7,639
Appui 2	62,5	0,247	0,986	0,2	266,358	9,945
Appui 2	62,5	0,247	0,247	0,2	71,593	2,673
Déviateur1	71,5	0,247	0,493	0,2	139,741	5,217
Déviateur2	89,5	0,247	0,740	0,2	204,610	7,639
Appui 3	98,5	0,247	0,986	0,2	266,358	9,945
Appui 3	98,5	0,236	0,236	0,2	68,473	2,556
Déviateur1	107,9375	0,236	0,471	0,2	133,794	4,995
Déviateur2	126,8125	0,236	0,707	0,2	196,110	7,322
Appui 4	136,25	0,236	0,942	0,2	255,559	9,541
Appui 4	136,25	0,338	0,338	0,2	97,352	3,635
Déviateur1	142,6875	0,338	0,677	0,2	188,336	7,032
Déviateur2	155,5625	0,338	1,015	0,2	273,366	10,206
Appui 5	162	0,338	1,353	0,2	352,834	13,173
Appui 5	162	0,338	0,338	0,2	97,352	3,635
Déviateur1	168,4375	0,338	0,677	0,2	188,336	7,032
Déviateur2	181,3125	0,338	1,015	0,2	273,366	10,206
Appui 6	187,75	0,338	1,353	0,2	352,834	13,173
Appui 6	187,75	0,338	0,338	0,2	97,352	3,635
Déviateur1	194,1875	0,338	0,677	0,2	188,336	7,032
Déviateur2	207,0625	0,338	1,015	0,2	273,366	10,206
Appui 7	213,5	0,338	1,353	0,2	352,834	13,173
Appui 7	213,5	0,186	0,186	0,2	54,225	2,025
Déviateur1	225,5625	0,186	0,371	0,2	106,474	3,975
Déviateur2	249,6875	0,186	0,557	0,2	156,819	5,855
Appui 8	261,75	0,186	0,742	0,2	205,329	7,666
Appui 8	261,75	0,186	0,186	0,2	54,225	2,025
Déviateur1	273,8125	0,186	0,371	0,2	106,474	3,975
Déviateur2	297,9375	0,186	0,557	0,2	156,819	5,855
Appui 9	310	0,186	0,742	0,2	205,329	7,666

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

III.3.1.1.2 Pertes par recul d'ancrage (8) :

Cette perte de tension résulte du recul (glissement) de l'ancrage, qui dépend des dispositifs d'ancrage utilisés. Juste après la mise en tension, les ancrages sont bloqués. Cependant, on observe une petite rentrée d'ancrage due à deux phénomènes :

- Le jeu existant dans l'ancrage permet un léger glissement avant le blocage définitif.
- L'effort appliqué par le vérin crée une déformation des pièces d'ancrage.

Ces deux phénomènes entraînent un raccourcissement du câble, noté g .

Et le mouvement de rentrée vers l'intérieur du béton est contrarié par le frottement du câble sur sa gaine, comme à la mise en tension, mais en sens inverse. Son influence diminue donc à partir de l'ancrage jusqu'à s'annuler à une distance λ de celui-ci à partir duquel la tension demeure inchangée

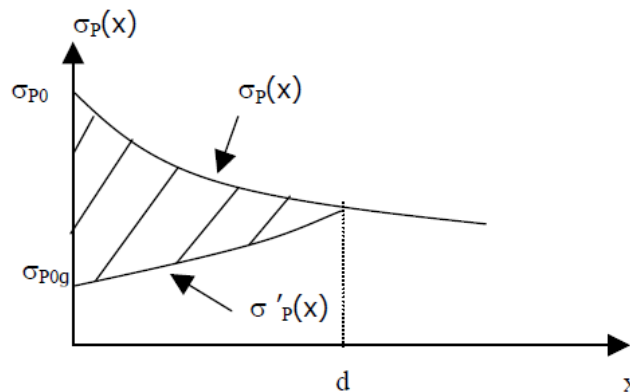


Figure III.4: Effet du glissement de l'ancrage

Avec :

σ_{p0} : la contrainte initiale avant recul d'ancrage.

σ_{p0g} : la valeur de la contrainte après le recul d'ancrage à l'origine.

$\sigma_p(x)$: la valeur de la contrainte en x avant le recul d'ancrage.

$\sigma'_p(x)$: la valeur de la contrainte en x après le recul d'ancrage

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

$$\Delta\sigma_{rec} = 2\sigma_0\psi(\lambda - x) \quad \text{Si } x < \lambda$$

$$\Delta\sigma_{rec} = 0 \quad \text{Si } x \geq \lambda$$

$$\text{Avec } \lambda = \sqrt{\frac{g'E_p}{\sigma_0\psi}} ; \quad \psi = f \frac{a_{tot}}{L} + \varphi$$

λ : Longueur d'influence du glissement

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

L : Longueur du câble

E : Module d'élasticité de l'acier égale à 195000 MPa

f : Coefficient de frottement en courbe

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

Tableau III.11: les pertes dues au recul d'ancrage pour la précontrainte de continuité

Section	X(m)	α_i (rd)	α_{tot} (rd)	Ψ	λ	$\Delta\sigma_{rec}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{rec}/\sigma_{p0}$ (%)
Culée	0	0,335	1,328	0,010	8,856	264,22	9,86
Déviateur1	8,83333333	0,335				66,57	2,49
Déviateur2	19,875	0,329				0,00	0,00
Appui 1	26,5	0,329				0,00	0,00
Appui 1	26,5	0,247	0,986	0,005	11,980	195,33	7,29
Déviateur1	35,5	0,247				48,58	1,81
Déviateur2	53,5	0,247				0,00	0,00
Appui 2	62,5	0,247				0,00	0,00
Appui 2	62,5	0,247	0,986	0,005	11,980	195,33	7,29
Déviateur1	71,5	0,247				48,58	1,81
Déviateur2	89,5	0,247				0,00	0,00
Appui 3	98,5	0,247				0,00	0,00
Appui 3	98,5	0,236	0,942	0,005	12,551	186,44	6,96
Déviateur1	107,9375	0,236				46,25	1,73
Déviateur2	126,8125	0,236				0,00	0,00
Appui 4	136,25	0,236				0,00	0,00
Appui 4	136,25	0,338	1,353	0,011	8,649	270,55	10,10
Déviateur1	142,6875	0,338				69,18	2,58
Déviateur2	155,5625	0,338				0,00	0,00
Appui 5	162	0,338				0,00	0,00
Appui 5	162	0,338	1,353	0,011	8,649	270,55	10,10
Déviateur1	168,4375	0,338				69,18	2,58
Déviateur2	181,3125	0,338				0,00	0,00
Appui 6	187,75	0,338				0,00	0,00
Appui 6	187,75	0,338	1,353	0,011	8,649	270,55	10,10
Déviateur1	194,1875	0,338				69,18	2,58
Déviateur2	207,0625	0,338				0,00	0,00
Appui 7	213,5	0,338				0,00	0,00
Appui 7	213,5	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	225,5625	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	249,6875	0,186				0,00	0,00
Appui 8	261,75	0,186				0,00	0,00
Appui 8	261,75	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	273,8125	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	297,9375	0,186				0,00	0,00
Appui 9	310	0,186				0,00	0,00

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

A

III.3.1.1.3 Perte par déformations instantanées du béton (8):

Lorsqu'un élément comporte plusieurs câbles et le fait de ne pas tendre en même temps tous les câbles d'un même élément provoque une perte de tension.

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

Il est à noter qu'avant de tirer les câbles, il faut s'assurer que le béton est assez résistant

La perte totale après la mise en tension de tous les câbles est donnée par la formule :

$$\Delta\sigma_{racc}(x) = \frac{n-1}{2n} \sigma_b(x) \frac{E_p}{E_{ij}} \quad (III. 29)$$

Avec

n : nombre de câbles (gainés)

E_p : module de Young des armatures de précontrainte (=195000 Mpa)

E_{ij} : module de Young instantané du béton au jour j

$$\text{À } t=28\text{jr} : E_{b28} = 11000 \sqrt[3]{f_{c28}} = 37619.47 \text{ Mpa}$$

$\sigma_b(x)$: est la contrainte moyenne du béton au niveau du CDG des câbles.

$$\sigma(x) = \frac{P}{S} + \frac{Pe^2}{I} + \frac{Me}{I} \quad (III. 30)$$

$$P = \sigma_0 (1 - \Delta\sigma_{rec} (\%) - \Delta\sigma_{fro} (\%)) A_p \quad (III. 31)$$

A_p : section d'armatures de précontrainte de tous les câbles

Tronçons 1 et 3 → 8 câbles de 12T15

Tronçons 2 → 8 câbles de 27T15

Tableau III.12: les pertes dues au non-simultanéité des mises en tension pour la précontrainte de continuité

Section	$\Delta\sigma_{fro}$	$\Delta\sigma_{rec}$ (Mpa)	M perm (kN.m)	P (kN)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{racc}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{racc}/\sigma_{p0}$ (%)
Culée	96,36	264,22	0,00	18542,54	3,85	8,74	0,33
Déviateur1	186,48	66,57	7959,76	19402,86	5,65	12,80	0,48
Déviateur2	269,46	0,00	-5316,60	19271,48	7,39	16,75	0,63
Appui 1	347,16	0,00	-15017,22	18649,91	4,83	10,95	0,41
Appui 1	71,59	195,33	-15017,22	19291,82	4,96	11,25	0,42
Déviateur1	139,74	48,58	11020,22	19920,59	5,41	12,28	0,46
Déviateur2	204,61	0,00	1670,53	19790,32	6,63	15,03	0,56
Appui 2	266,36	0,00	-20579,76	19296,33	5,35	12,14	0,45
Appui 2	71,59	195,33	-20579,76	19291,82	5,35	12,14	0,45
Déviateur1	139,74	48,58	6735,68	19920,59	5,99	13,58	0,51
Déviateur2	204,61	0,00	-2068,38	19790,32	7,13	16,17	0,60
Appui 3	266,36	0,00	-23813,93	19296,33	5,58	12,66	0,47
Appui 3	68,47	186,44	-23813,93	19387,87	5,60	12,70	0,47
Déviateur1	133,79	46,25	8294,79	19986,87	5,80	13,16	0,49
Déviateur2	196,11	0,00	6092,06	19858,32	6,06	13,73	0,51
Appui 4	255,56	0,00	-18063,29	19382,73	5,19	11,78	0,44
Appui 4	97,35	270,55	-18063,29	18484,00	5,01	11,36	0,42
Déviateur1	188,34	69,18	-244,21	19367,07	6,74	15,28	0,57
Déviateur2	273,37	0,00	-1330,16	19240,27	6,84	15,51	0,58
Appui 5	352,83	0,00	-9551,97	18604,53	4,43	10,05	0,38
Appui 5	97,35	270,55	-9551,97	18484,00	4,41	10,00	0,37
Déviateur1	188,34	69,18	6665,91	19367,07	5,81	13,17	0,49
Déviateur2	273,37	0,00	3065,83	19240,27	6,25	14,17	0,53
Appui 6	352,83	0,00	-6840,29	18604,53	4,24	9,62	0,36
Appui 6	97,35	270,55	-6840,29	18484,00	4,22	9,56	0,36
Déviateur1	188,34	69,18	1154,70	19367,07	6,55	14,85	0,55
Déviateur2	273,37	0,00	-14413,26	19240,27	8,60	19,50	0,73
Appui 7	352,83	0,00	-31778,04	18604,53	6,00	13,62	0,51
Appui 7	54,23	146,39	-31778,04	19822,25	6,25	14,17	0,53
Déviateur1	106,47	35,92	12785,12	20288,06	5,30	12,03	0,45
Déviateur2	156,82	0,00	6818,84	20172,65	6,07	13,76	0,51
Appui 8	205,33	0,00	-46204,77	19784,57	7,26	16,47	0,61
Appui 8	54,23	146,39	-46204,77	19822,25	7,27	16,49	0,62
Déviateur1	106,47	35,92	4534,87	20288,06	6,41	14,54	0,54
Déviateur2	156,82	0,00	5952,04	20172,65	6,18	14,02	0,52

La suite du tableau présentant les pertes dues au non-simultanéité des mises en tension, est donnée dans l'annexe A

III.3.1.1.4 Récapitulatifs des pertes instantanées :

Tableau III.13: les pertes instantanées pour la précontrainte de service du tronçons 3

Section	X(m)	Pertes par frottement (%)	Pertes par recule d'encrage (%)	Pertes par raccourcissement (%)	Pertes instantanée totale (%)
Culée	0	3,60	9,86	0,33	13,79
Déviateur1	8,83333333	6,96	2,49	0,48	9,93
Déviateur2	19,875	10,06	0,00	0,63	10,69
Appui 1	26,5	12,96	0,00	0,41	13,37
Appui 1	26,5	2,67	7,29	0,42	10,39
Déviateur1	35,5	5,22	1,81	0,46	7,49
Déviateur2	53,5	7,64	0,00	0,56	8,20
Appui 2	62,5	9,94	0,00	0,45	10,40
Appui 2	62,5	2,67	7,29	0,45	10,42
Déviateur1	71,5	5,22	1,81	0,51	7,54
Déviateur2	89,5	7,64	0,00	0,60	8,24
Appui 3	98,5	9,94	0,00	0,47	10,42
Appui 3	98,5	2,56	6,96	0,47	9,99
Déviateur1	107,9375	5,00	1,73	0,49	7,21
Déviateur2	126,8125	7,32	0,00	0,51	7,83
Appui 4	136,25	9,54	0,00	0,44	9,98
Appui 4	136,25	3,63	10,10	0,42	14,16
Déviateur1	142,6875	7,03	2,58	0,57	10,19
Déviateur2	155,5625	10,21	0,00	0,58	10,79
Appui 5	162	13,17	0,00	0,38	13,55
Appui 5	162	3,63	10,10	0,37	14,11
Déviateur1	168,4375	7,03	2,58	0,49	10,11
Déviateur2	181,3125	10,21	0,00	0,53	10,74
Appui 6	187,75	13,17	0,00	0,36	13,53
Appui 6	187,75	3,63	10,10	0,36	14,09
Déviateur1	194,1875	7,03	2,58	0,55	10,17
Déviateur2	207,0625	10,21	0,00	0,73	10,93
Appui 7	213,5	13,17	0,00	0,51	13,68
Appui 7	213,5	2,02	5,47	0,53	8,02
Déviateur1	225,5625	3,98	1,34	0,45	5,77
Déviateur2	249,6875	5,85	0,00	0,51	6,37
Appui 8	261,75	7,67	0,00	0,61	8,28
Appui 8	261,75	2,02	5,47	0,62	8,11
Déviateur1	273,8125	3,98	1,34	0,54	5,86
Déviateur2	297,9375	5,85	0,00	0,52	6,38
Appui 9	310	7,67	0,00	0,60	8,26

La suite du tableau présentant les pertes instantanées, est donnée dans l'annexe A

III.3.1.2 Pertes de tension différées :

Elles se produisent dans un temps plus ou moins long après la mise en tension.

On a :

- les pertes due au retrait du béton.
- les pertes due au fluage.
- les pertes à la relaxation de l'aciers

III.3.1.2.1 Pertes dues au retrait du Béton (7):

Le retrait est un phénomène de raccourcissement du béton dans le temps, dû à une évaporation de l'eau excédentaire contenue dans le béton et à des réactions chimiques. Ce retrait à lieu dans les premiers mois après le coulage du béton

$$\Delta\sigma_{ret} = \varepsilon_r E_p \quad (III. 32)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_0 K_s (r(t) - r(t_0)) \quad (III. 33)$$

ε_r : Facteur dépendant du climat

t: l'âge du béton au moment de sa mise en précontrainte

r (t) : fonction traduisant l'évolution du retrait en fonction du temps

$$r(t) = \frac{t}{t + 9R_m} \quad (III. 34)$$

$$R_m = \frac{2A}{P} \quad (III. 35)$$

A : est la section du voussoir

P : le périmètre de la section

$$k_s = \frac{1}{1 + 20\rho_s}; \rho_s = \frac{A_s}{B} \quad (III. 36)$$

En générale $\rho_s = 0.5\%$

→ $k_s = 0.91$

$$\varepsilon_0 = (100 - \rho_h) \left(6 + \frac{80}{100 + R_m} \right) 10^{-6} \quad (III. 36)$$

Dans l'aire on prend : $\rho_h = 75\%$;

ρ_h : Humidité relative moyenne

$P = 36.8$; $R = 6.8 \text{ m}^2$

→ $R_m = 37 \text{ cm}$

→ $\varepsilon_0 = 1.64 \times 10^{-4}$

À 14 jours :

$r(14) = 0.0403$

$\varepsilon_r = 6.043 \times 10^{-6}$

$\Delta\sigma_{ret} = 1.1785 \text{ Mpa}$

$\Delta\sigma_{ret}(\%) = 0.079 \%$

À 28 jours :

$$r(28) = 0,0776$$

$$\varepsilon_r = 1,161 \times 10^{-5}$$

$$\Delta\sigma_{ret} = 2,2655 \text{ Mpa}$$

$$\Delta\sigma_{ret}(\%) = 0,152 \%$$

À $t \rightarrow \infty$:

$$r(\infty) = 1$$

$$\varepsilon_r = 1,4963 \times 10^{-4}$$

$$\Delta\sigma_{ret} = 29,177 \text{ Mpa}$$

$$\Delta\sigma_{ret}(\%) = 1,96 \%$$

III.3.1.2.2 Pertes dues au fluage du béton (7) :

Le fluage du béton est la déformation sous la charge permanente occasionnant une perte de tension dans les câbles de précontrainte

Elles se calculent comme suit :

$$\Delta\sigma_{Fl} = \frac{\sigma_b \times E_p \times K_{fl} \times f(t-t_i)}{E_{bj}} \quad (III.37)$$

$$K_{fl} = K_s \times (K_e \times K_c \times K(t_0)) \quad (III.38)$$

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

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

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

$$K_c = \frac{120 - \rho_h}{30} + \frac{2(100 - \rho_h)}{3(20 + R_m)} = 1,792$$

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

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

t_0 : âge de béton, lors de mise en tension

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

$$K_s = 0,91 ; K_e = 0,4$$

σ_{bo} : Contrainte probable du béton au niveau du C.D.G des câbles dans les sections

-Pertes entre 14 et 28 jours :

$$K(14) = 0,877$$

$$K_{fl} = 1,793$$

$$f(28 - 14) = \frac{\sqrt{28 - 14}}{\sqrt{28 - 14} + 5 \times \sqrt{37}} = 0,109$$

$$P = \sigma_0 (1 - \Delta\sigma_i (\%)) A_p \quad (III. 39)$$

Tableau III.14: les pertes dues au fluage du béton de 14 à 28 jours pour la précontrainte de continuité

Section	Perte instant (%)	P (kN)	M (kN.m)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{fu14}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu14}/\sigma_{p0}$ (%)
Culée	13,79	18472,66	0,00	3,84	7,04	0,47
Déviateur1	9,93	19300,43	12408,61	5,01	9,19	0,62
Déviateur2	10,69	19137,47	-1044,32	6,77	12,41	0,83
Appui 1	13,37	18562,30	-33791,29	6,14	11,26	0,76
Appui 1	10,39	19201,86	-33791,29	6,27	11,49	0,77
Déviateur1	7,49	19822,38	19373,34	4,26	7,80	0,52
Déviateur2	8,20	19670,10	313,02	6,77	12,41	0,83
Appui 2	10,40	19199,22	-28604,52	5,90	10,82	0,73
Appui 2	10,42	19194,73	-28604,52	5,90	10,82	0,73
Déviateur1	7,54	19811,92	8312,66	5,74	10,53	0,71
Déviateur2	8,24	19660,98	1580,53	6,59	12,09	0,81
Appui 3	10,42	19195,08	-32020,47	6,14	11,26	0,76
Appui 3	9,99	19286,28	-32020,47	6,16	11,29	0,76
Déviateur1	7,21	19881,58	-4428,19	7,48	13,71	0,92
Déviateur2	7,83	19748,47	-10779,36	8,29	15,20	1,02
Appui 4	9,98	19288,53	-25014,12	5,66	10,39	0,70
Appui 4	14,16	18393,10	-25014,12	5,48	10,06	0,68
Déviateur1	10,19	19244,84	-6215,57	7,50	13,75	0,92
Déviateur2	10,79	19116,18	-3576,75	7,10	13,02	0,87
Appui 5	13,55	18524,10	-11140,13	4,53	8,31	0,56
Appui 5	14,11	18404,01	-11140,13	4,51	8,26	0,56
Déviateur1	10,11	19261,70	482,07	6,60	12,11	0,81
Déviateur2	10,74	19126,91	-1293,73	6,80	12,46	0,84
Appui 6	13,53	18527,57	-6006,21	4,17	7,64	0,51
Appui 6	14,09	18407,49	-6006,21	4,14	7,60	0,51
Déviateur1	10,17	19248,25	5358,96	5,94	10,90	0,73
Déviateur2	10,93	19084,25	4152,36	6,05	11,09	0,75
Appui 7	13,68	18495,60	-41276,02	6,65	12,20	0,82
Appui 7	8,02	19708,85	-41276,02	6,90	12,65	0,85
Déviateur1	5,77	20191,85	-32326,70	11,34	20,79	1,40
Déviateur2	6,37	20062,60	-32974,83	11,38	20,87	1,40
Appui 8	8,28	19652,81	-58720,31	8,12	14,89	1,00
Appui 8	8,11	19690,35	-58720,31	8,13	14,91	1,00
Déviateur1	5,86	20171,71	-34004,03	11,56	21,20	1,42
Déviateur2	6,38	20060,48	-23770,90	10,14	18,60	1,25
Appui 9	8,26	19656,87	-55455,28	7,89	14,47	0,97

La suite du tableau présentant les pertes dues au fluage du béton de 14 à 28 jours, est donnée dans l'annexe A

-Pertes entre 28 jours et ∞ :

$$K(28) = 0,781 ; K_{fl} = 1,636 \quad ; \quad f(\infty - 28) = 1 - 0,109 = 0,8903$$

Pour calculer la perte due au fluage à l'infini, il faut prendre en compte les pertes totales à 28 jours : $P = \sigma_0(1 - \Delta\sigma_i (\%) - \Delta\sigma_{flu14} (\%)) A_p$ (III. 40)

Tableau III.15: les pertes dues au fluage du béton de 28 à ∞ jours pour la précontrainte de continuité

Section	Perte instant (%)	P (kN)	M (kN.m)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu}/\sigma_{p0}$ (%)
Culée	13,79	18371,33	0,00	3,82	51,90	3,49
Déviateur1	9,93	19168,08	12408,61	4,97	67,53	4,54
Déviateur2	10,69	18958,82	-1044,32	6,70	91,16	6,13
Appui 1	13,37	18400,21	-33791,29	6,11	83,02	5,58
Appui 1	10,39	19036,36	-33791,29	6,23	84,77	5,70
Déviateur1	7,49	19710,01	19373,34	4,22	57,34	3,85
Déviateur2	8,20	19491,40	313,02	6,71	91,18	6,13
Appui 2	10,40	19043,42	-28604,52	5,87	79,80	5,36
Appui 2	10,42	19038,95	-28604,52	5,87	79,79	5,36
Déviateur1	7,54	19660,35	8312,66	5,69	77,34	5,20
Déviateur2	8,24	19486,86	1580,53	6,53	88,84	5,97
Appui 3	10,42	19032,92	-32020,47	6,11	83,06	5,58
Appui 3	9,99	19123,63	-32020,47	6,13	83,31	5,60
Déviateur1	7,21	19684,10	-4428,19	7,41	100,76	6,77
Déviateur2	7,83	19529,64	-10779,36	8,21	111,66	7,50
Appui 4	9,98	19138,95	-25014,12	5,63	76,62	5,15
Appui 4	14,16	18248,29	-25014,12	5,45	74,17	4,98
Déviateur1	10,19	19046,83	-6215,57	7,43	101,03	6,79
Déviateur2	10,79	18928,73	-3576,75	7,03	95,65	6,43
Appui 5	13,55	18404,49	-11140,13	4,51	61,26	4,12
Appui 5	14,11	18285,04	-11140,13	4,48	60,94	4,10
Déviateur1	10,11	19087,34	482,07	6,54	88,97	5,98
Déviateur2	10,74	18947,47	-1293,73	6,73	91,56	6,15
Appui 6	13,53	18417,53	-6006,21	4,15	56,37	3,79
Appui 6	14,09	18298,09	-6006,21	4,12	56,04	3,77
Déviateur1	10,17	19091,33	5358,96	5,89	80,07	5,38
Déviateur2	10,93	18924,54	4152,36	5,99	81,49	5,48
Appui 7	13,68	18319,89	-41276,02	6,62	90,00	6,05
Appui 7	8,02	19526,68	-41276,02	6,86	93,31	6,27
Déviateur1	5,77	19892,42	-32326,70	11,24	152,79	10,27
Déviateur2	6,37	19762,04	-32974,83	11,28	153,36	10,31
Appui 8	8,28	19438,37	-58720,31	8,08	109,83	7,38
Appui 8	8,11	19475,72	-58720,31	8,08	109,94	7,39
Déviateur1	5,86	19866,50	-34004,03	11,45	155,73	10,47
Déviateur2	6,38	19792,65	-23770,90	10,05	136,66	9,18
Appui 9	8,26	19448,51	-55455,28	7,85	106,72	7,17

La suite du tableau présentant les pertes dues au fluage du béton de 28 à ∞ jours, est donnée dans l'annexe A

III.3.1.2.3 Pertes dues à la Relaxation des aciers (8) :

$$\Delta\sigma_{rel} = \frac{6\rho_{1000}}{100} \left(\frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}} - u_0 \right) \sigma_{pi}(x) \quad (III.41)$$

Dans laquelle :

ρ_{1000} : coefficient de relaxation des aciers de précontrainte à 1000 h (en %)

f_{prg} : contrainte limite garantie à la rupture des aciers de précontrainte.

Pour les armatures très basse relaxation (TBR)

$$u_0 = 0.43 \quad \rho_{1000} = 2,5\% \quad f_{prg} = 1860 \text{ Mpa}$$

$\sigma_{pi}(x)$: contrainte initiale dans les armatures de précontrainte, après les pertes instantanées

$$\sigma_{pi}(x) = \sigma_{po} (1 - \Delta\sigma_{pi} (\%)) \quad (III.42)$$

Tableau III.16: les pertes dues à la relaxation des aciers pour la précontrainte de continuité

Section	X(m)	σ_{bi} (Mpa)	$\Delta\sigma_{rel}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{rel}/\sigma_{p0}$ (%)
Culée	0,00	1282,82	65,07	4,37
Déviateur1	8,83	1340,31	74,91	5,03
Déviateur2	19,88	1328,99	72,92	4,90
Appui 1	26,50	1289,05	66,11	4,44
Appui 1	26,50	1333,46	73,70	4,95
Déviateur1	35,50	1376,55	81,41	5,47
Déviateur2	53,50	1365,98	79,49	5,34
Appui 2	62,50	1333,28	73,67	4,95
Appui 2	62,50	1332,97	73,62	4,95
Déviateur1	71,50	1375,83	81,28	5,46
Déviateur2	89,50	1365,35	79,38	5,33
Appui 3	98,50	1332,99	73,62	4,95
Appui 3	98,50	1339,32	74,73	5,02
Déviateur1	107,94	1380,67	82,17	5,52
Déviateur2	126,81	1371,42	80,48	5,41
Appui 4	136,25	1339,48	74,76	5,02
Appui 4	136,25	1277,30	64,16	4,31
Déviateur1	142,69	1336,45	74,23	4,99
Déviateur2	155,56	1327,51	72,66	4,88
Appui 5	162,00	1286,40	65,66	4,41
Appui 5	162,00	1278,06	64,28	4,32
Déviateur1	168,44	1337,62	74,43	5,00
Déviateur2	181,31	1328,26	72,79	4,89
Appui 6	187,75	1286,64	65,70	4,42
Appui 6	187,75	1278,30	64,32	4,32
Déviateur1	194,19	1336,68	74,27	4,99
Déviateur2	207,06	1325,30	72,28	4,86
Appui 7	213,50	1284,42	65,33	4,39
Appui 7	213,50	1368,67	79,98	5,37
Déviateur1	225,56	1402,21	86,16	5,79
Déviateur2	249,69	1393,24	84,49	5,68

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

III.3.1.2.4 Les pertes totales des câbles extérieurs (8)

$$\Delta\sigma_{\text{tot}} = \Delta\sigma_{\text{pi}} + \Delta\sigma_{\text{pd}} \quad (\text{III. 43})$$

$$\Delta\sigma_{\text{pd}} = \Delta\sigma_{\text{ret}} + \Delta\sigma_{\text{flu}} + \frac{5}{6\Delta\sigma_{\text{rel}}} \quad (\text{III. 44})$$

Tableau III.17: les pertes totales pour la précontrainte de continuité

Section	% $\Delta\sigma_{\text{pi}}$	% $\Delta\sigma_{\text{ret}}$	% $\Delta\sigma_{\text{flu}}$	5/6% $\Delta\sigma_{\text{rel}}$	% $\Delta\sigma_{\text{pd}}$	Perte totale
Culée	13,79	1,97	3,49	3,64	9,10	22,89
Déviateur1	9,93	1,09	4,54	4,19	9,83	19,75
Déviateur2	10,69	1,09	6,13	4,08	11,30	21,99
Appui 1	13,37	1,09	5,58	3,70	10,37	23,74
Appui 1	10,39	1,09	5,70	4,13	10,92	21,30
Déviateur1	7,49	1,09	3,85	4,56	9,50	16,99
Déviateur2	8,20	1,09	6,13	4,45	11,67	19,87
Appui 2	10,40	1,09	5,36	4,13	10,58	20,98
Appui 2	10,42	1,09	5,36	4,12	10,58	21,00
Déviateur1	7,54	1,09	5,20	4,55	10,84	18,38
Déviateur2	8,24	1,09	5,97	4,45	11,51	19,75
Appui 3	10,42	1,09	5,58	4,12	10,80	21,21
Appui 3	9,99	1,09	5,60	4,19	10,88	20,87
Déviateur1	7,21	1,09	6,77	4,60	12,47	19,68
Déviateur2	7,83	1,09	7,50	4,51	13,10	20,94
Appui 4	9,98	1,09	5,15	4,19	10,43	20,41
Appui 4	14,16	1,09	4,98	3,59	9,67	23,83
Déviateur1	10,19	1,09	6,79	4,16	12,04	22,22
Déviateur2	10,79	1,09	6,43	4,07	11,59	22,38
Appui 5	13,55	1,09	4,12	3,68	8,89	22,44
Appui 5	14,11	1,09	4,10	3,60	8,79	22,90
Déviateur1	10,11	1,09	5,98	4,17	11,24	21,35
Déviateur2	10,74	1,09	6,15	4,08	11,32	22,06
Appui 6	13,53	1,09	3,79	3,68	8,56	22,09
Appui 6	14,09	1,09	3,77	3,60	8,46	22,55
Déviateur1	10,17	1,09	5,38	4,16	10,63	20,80
Déviateur2	10,93	1,09	5,48	4,05	10,62	21,55
Appui 7	13,68	1,09	6,05	3,66	10,80	24,48
Appui 7	8,02	1,09	6,27	4,48	11,84	19,86
Déviateur1	5,77	1,09	10,27	4,83	16,19	21,95
Déviateur2	6,37	1,09	10,31	4,73	16,13	22,50
Appui 8	8,28	1,09	7,38	4,44	12,91	21,19
Appui 8	8,11	1,09	7,39	4,47	12,95	21,05

La suite du tableau présentant les pertes totales, est donnée dans l'annexe A

III.3.2 Calcul des pertes pour la précontraintes de poussage :

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

Note : dans ce qui se suit seulement les pertes de précontrainte de poussage du tronçon 3 seront présentées dans les tableaux, les pertes de poussage du tronçon 1 sont données dans l'annexe B.

III.3.2.1 Calcul des pertes instantanées**III.3.2.1.1 Pertes dues au frottement :**

Même si les câbles sont rectilignes, cela n'empêche pas l'existence des ondulations parasites.

L'exposant étant faible, il est admis de prendre la formule approchée pour le calcul des pertes dues au frottement, à savoir :

$$\Delta\sigma_{frot} = \sigma p_0 (f \propto + \varphi l) \quad (III.45)$$

l : représente la distance entre le point donné et le début du voussoir où se trouve le point

Tableau III.18: les pertes dues au frottement pour la précontrainte de poussage du tronçon 3

Section	X(m)	l(m)	α i (rd)	f(rd ⁻¹)	Ψ (m ⁻¹)	$\Delta\sigma_{frot}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{frot}/\sigma_{p0}$ (%)
Culée 2	0,00	0,00	0,3038	0,20	0,0016	90,41	6,08
Déviateur1	13,50	13,50	0,3038	0,20	0,0016	122,55	8,24
Déviateur2	30,38	30,38	0,3038	0,20	0,0016	162,73	10,94
Appui 1	40,50	10,03	0,3038	0,20	0,0016	114,29	7,68
Déviateur1	51,75	0,26	0,3038	0,20	0,0016	91,03	6,12
Déviateur2	74,25	22,76	0,3038	0,20	0,0016	144,60	9,72
Appui 2	85,50	8,39	0,3038	0,20	0,0016	110,38	7,42
Déviateur1	96,75	0,22	0,3038	0,20	0,0016	90,94	6,11
Déviateur2	119,25	22,72	0,3038	0,20	0,0016	144,51	9,71
Appui 3	130,50	8,33	0,3038	0,20	0,0016	110,23	7,41
Déviateur1	141,75	0,19	0,3038	0,20	0,0016	90,86	6,11
Déviateur2	164,25	22,69	0,3038	0,20	0,0016	144,42	9,71
Appui 4	175,50	8,32	0,3038	0,20	0,0016	110,21	7,41
Déviateur1	188,25	0,85	0,3038	0,20	0,0016	92,44	6,21
Déviateur2	213,75	26,35	0,3038	0,20	0,0016	153,15	10,29
Appui 5	226,50	9,08	0,3038	0,20	0,0016	112,02	7,53
Déviateur1	239,25	0,81	0,3038	0,20	0,0016	92,34	6,21
Déviateur2	264,75	26,31	0,3038	0,20	0,0016	153,05	10,29
Appui 6	277,50	9,04	0,3038	0,20	0,0016	111,92	7,52
Déviateur1	290,25	0,77	0,3038	0,20	0,0016	92,24	6,20
Déviateur2	315,75	26,27	0,3038	0,20	0,0016	152,95	10,28
Appui 7	328,50	9,00	0,3038	0,20	0,0016	111,83	7,52
Déviateur1	341,25	0,73	0,3038	0,20	0,0016	92,14	6,19
Déviateur2	366,75	26,23	0,3038	0,20	0,0016	152,85	10,27
Appui 8	379,50	8,95	0,3038	0,20	0,0016	111,73	7,51
	388,95	18,40	0,3038	0,20	0,0016	134,23	9,02

III.3.2.1.2 Pertes dues au recul d'ancrage

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

$$\Delta\sigma_{rec} = 2\sigma_0\psi(\lambda - x) \quad \text{Si } x < \lambda$$

$$\Delta\sigma_{rec} = 0 \quad \text{Si } x \geq \lambda$$

$$\text{Avec } \lambda = \sqrt{\frac{g'E_p}{\sigma_0\psi}} ; \quad \psi = f \frac{a_{tot}}{L} + \varphi$$

λ : Longueur d'influence du glissement

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

L : Longueur du câble (égale à la longueur du voussoir)

E : Module d'élasticité de l'acier égale à 195000 MPa

Tableau III.19: les pertes dues au recul d'ancrage pour la précontrainte de poussage du tronçons 3

Section	X(m)	L(m)	a_{tot} (rd)	$\Psi(m^{-1})$	λ	$\Delta\sigma_{encr}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{enc}/\sigma_{p0}$ (%)
Culée2	0,00	30,472	0,30	0,0016	14,84	157,65	5,89
Déviateur1	13,50					121,80	4,55
Déviateur2	30,38					0,00	0,00
Appui 1	40,50	21,019	0,30	0,0016	13,29	142,89	5,33
Déviateur1	51,75	25,62	0,30	0,0016	14,12	164,92	6,16
Déviateur2	74,25					0,00	0,00
Appui 2	85,50	19,416	0,30	0,0016	12,95	151,45	5,65
Déviateur1	96,75	25,62	0,30	0,0016	14,12	165,03	6,16
Déviateur2	119,25					0,00	0,00
Appui 3	130,50	19,416	0,30	0,0016	12,95	151,67	5,66
Déviateur1	141,75	25,62	0,30	0,0016	14,12	165,13	6,17
Déviateur2	164,25					0,00	0,00
Appui 4	175,50	20,216	0,30	0,0016	13,12	150,09	5,60
Déviateur1	188,25	30,024	0,30	0,0016	14,78	156,02	5,83
Déviateur2	213,75					0,00	0,00
Appui 5	226,50	21,017	0,30	0,0016	13,29	146,05	5,45
Déviateur1	239,25	30,024	0,30	0,0016	14,78	156,13	5,83
Déviateur2	264,75					0,00	0,00
Appui 6	277,50	21,017	0,30	0,0016	13,29	146,18	5,46
Déviateur1	290,25	30,024	0,30	0,0016	14,78	156,24	5,83
Déviateur2	315,75					0,00	0,00
Appui 7	328,50	21,017	0,30	0,0016	13,29	146,32	5,46
Déviateur1	341,25	30,024	0,30	0,0016	14,78	156,35	5,84
Déviateur2	366,75					0,00	0,00
Appui 8	379,50	18,715	0,30	0,0016	12,79	150,93	5,63
	388,95					0,00	0,00

III.3.2.1.3 Perte par déformations instantanées du béton :

La perte totale après la mise en tension de tous les câbles est donnée par la formule :

$$\Delta\sigma_{racc}(x) = \frac{n-1}{2n} \sigma_b(x) \frac{E_p}{E_{ij}} \quad (III. 46)$$

$$f_{c14} = \frac{t \times b_c}{(4,76 + 0,83t)} = 34.19 \text{ Mpa} \quad ; \quad E_{b14} = 11000 \sqrt[3]{f_{c14}} = 35701.3 \text{ Mpa}$$

Avec

n : nombre de câbles

E_p : module de Young des armatures de précontrainte

E_{ij} : module de Young instantané du béton au jour j

$\sigma_b(x)$: est la contrainte moyenne du béton au niveau du CDG des câbles.

$$\sigma(x) = \frac{P}{s} + \frac{Pe^2}{I} + \frac{Me}{I} \quad (III. 47)$$

$$P = \sigma_0 (1 - \Delta\sigma_{rec} (\%) - \Delta\sigma_{fro} (\%)) A_p \quad (III. 48)$$

M : Moment dû au poids propre

A_p : section d'armatures de précontrainte de tous les câbles

Tableau III.20 : les pertes dues au non-simultanéité des mises en tension pour la précontrainte de poussage du tronçons 3

Section	$\Delta\sigma_{fro}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{rec}$ (Mpa)	M perm (kN.m)	P (kN)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{acc}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{acc}$ (%)
Culée 2	90,41	157,65	0,00	26782,65	7,21	17,14	0,64
Déviateur1	122,55	121,80	21749,08	17908,47	4,63	10,50	0,39
Déviateur2	162,73	0,00	-2673,92	19083,92	9,33	21,15	0,79
Appui 1	114,29	142,89	-52564,69	26585,75	12,71	30,18	1,13
Déviateur1	91,03	164,92	10953,52	17741,50	6,39	14,48	0,54
Déviateur2	144,60	0,00	-1787,48	19345,02	9,30	21,09	0,79
Appui 2	110,38	151,45	-54014,53	26485,14	12,83	30,48	1,14
Déviateur1	90,94	165,03	14370,22	17741,22	5,81	13,17	0,49
Déviateur2	144,51	0,00	669,74	19346,26	8,88	20,14	0,75
Appui 3	110,23	151,67	-49032,95	26483,63	12,31	29,23	1,09
Déviateur1	90,86	165,13	7502,82	17740,93	6,97	15,81	0,59
Déviateur2	144,42	0,00	-4344,86	19347,49	9,73	22,08	0,82
Appui 4	110,21	150,09	-54377,04	26518,30	12,88	30,60	1,14
Déviateur1	92,44	156,02	14683,38	17849,40	5,80	13,16	0,49
Déviateur2	153,15	0,00	5149,24	19221,88	8,06	18,28	0,68
Appui 5	112,02	146,05	-58274,38	26566,50	13,30	31,60	1,18
Déviateur1	92,34	156,13	7882,82	17849,23	6,96	15,78	0,59
Déviateur2	153,05	0,00	6635,00	19223,28	7,81	17,71	0,66
Appui 6	111,92	146,18	-53848,52	26565,67	12,83	30,49	1,14
Déviateur1	92,24	156,24	8424,59	17849,05	6,87	15,57	0,58
Déviateur2	152,95	0,00	309,86	19224,69	8,89	20,15	0,75
Appui 7	111,83	146,32	-60123,25	26564,85	13,50	32,06	1,20
Déviateur1	92,14	156,35	8025,07	17848,88	6,93	15,73	0,59
Déviateur2	152,85	0,00	18403,03	19226,10	5,81	13,18	0,49
Appui 8	111,73	150,93	-37927,41	26467,45	11,13	26,44	0,99

III.3.2.1.4 Récapitulatifs des pertes instantanées :

$$\Delta\sigma_i(\%) = \Delta\sigma_{frot} + \Delta\sigma_{znc} + \Delta\sigma_{racc} \quad (III.49)$$

Tableau III.21: les pertes instantanées pour la précontrainte de poussage du tronçons 3

Section	X(m)	Perte par frottement (%)	Perte par recule d'encrage (%)	Perte par raccourcissement (%)	Perte instantanée totale (%)
Culée 2	0	6,08	5,89	0,64	12,60
Déviateur1	13,5	8,24	4,55	0,39	13,18
Déviateur2	30,375	10,94	0,00	0,79	11,73
Appui 1	40,5	7,68	5,33	1,13	14,14
Déviateur1	51,75	6,12	6,16	0,54	12,82
Déviateur2	74,25	9,72	0,00	0,79	10,50
Appui 2	85,5	7,42	5,65	1,14	14,21
Déviateur1	96,75	6,11	6,16	0,49	12,76
Déviateur2	119,25	9,71	0,00	0,75	10,46
Appui 3	130,5	7,41	5,66	1,09	14,16
Déviateur1	141,75	6,11	6,17	0,59	12,86
Déviateur2	164,25	9,71	0,00	0,82	10,53
Appui 4	175,5	7,41	5,60	1,14	14,15
Déviateur1	188,25	6,21	5,83	0,49	12,53
Déviateur2	213,75	10,29	0,00	0,68	10,97
Appui 5	226,5	7,53	5,45	1,18	14,16
Déviateur1	239,25	6,21	5,83	0,59	12,62
Déviateur2	264,75	10,29	0,00	0,66	10,95
Appui 6	277,5	7,52	5,46	1,14	14,12
Déviateur1	290,25	6,20	5,83	0,58	12,61
Déviateur2	315,75	10,28	0,00	0,75	11,03
Appui 7	328,5	7,52	5,46	1,20	14,18
Déviateur1	341,25	6,19	5,84	0,59	12,62
Déviateur2	366,75	10,27	0,00	0,49	10,76
Appui 8	379,5	7,51	5,63	0,99	14,13

III.3.2.2 Pertes de tension différées :**III.3.2.2.1 Pertes dues au retrait du Béton**

Le principe de calcul est le même (voir les calculs des pertes dans les câbles de continuité)

À $t \rightarrow \infty$:

$r(\infty) = 1$

$$\varepsilon_r = 1,4963 \times 10^{-4}$$

$$\Delta\sigma_{ret} = 29,177 \text{ Mpa}$$

$$\Delta\sigma_{ret}(\%) = 1,96 \%$$

III.3.2.2 Pertes dues au fluage du béton

-Pertes entre 14 et 28 jours :

$$K(14) = 0,877$$

$$K_{fl} = 1,793$$

$$f(28 - 14) = \frac{\sqrt{28-14}}{\sqrt{28-14} + 5 \times \sqrt{37}} = 0,109$$

$$P = \sigma_0(1 - \Delta\sigma_i(\%)) A_p$$

Tableau III.22: les pertes dues au fluage du béton de 14 à 28 jours pour la précontrainte de poussage du tronçons 3

Section	Perte instant	P (kN)	M (kN.m)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{fu14}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu14} / \sigma_{p0}$ (%)
Culée2	12,60	28090,41	0,00	7,57	13,88	0,52
Déviateur1	13,18	18604,03	21749,08	4,95	9,08	0,34
Déviateur2	11,73	18914,69	-2673,92	9,25	16,96	0,63
Appui 1	14,14	27595,31	-52564,69	12,98	23,80	0,89
Déviateur1	12,82	18681,14	10953,52	6,82	12,51	0,47
Déviateur2	10,50	19176,33	-1787,48	9,22	16,91	0,63
Appui 2	14,21	27573,29	-54014,53	13,12	24,07	0,90
Déviateur1	12,76	18692,07	14370,22	6,25	11,46	0,43
Déviateur2	10,46	19185,13	669,74	8,81	16,15	0,60
Appui 3	14,16	27588,88	-49032,95	12,60	23,11	0,86
Déviateur1	12,86	18671,28	7502,82	7,41	13,58	0,51
Déviateur2	10,53	19170,89	-4344,86	9,65	17,70	0,66
Appui 4	14,15	27592,01	-54377,04	13,17	24,15	0,90
Déviateur1	12,53	18742,66	14683,38	6,22	11,40	0,43
Déviateur2	10,97	19075,62	5149,24	7,99	14,66	0,55
Appui 5	14,16	27589,33	-58274,38	13,58	24,90	0,93
Déviateur1	12,62	18722,21	7882,82	7,36	13,51	0,50
Déviateur2	10,95	19081,59	6635,00	7,74	14,20	0,53
Appui 6	14,12	27603,12	-53848,52	13,11	24,05	0,90
Déviateur1	12,61	18724,41	8424,59	7,27	13,34	0,50
Déviateur2	11,03	19063,48	309,86	8,81	16,16	0,60
Appui 7	14,18	27584,74	-60123,25	13,77	25,25	0,94
Déviateur1	12,62	18723,71	8025,07	7,34	13,46	0,50
Déviateur2	10,76	19120,67	18403,03	5,76	10,57	0,39
Appui 8	14,13	27599,05	-37927,41	11,43	20,97	0,78

-Pertes entre 28 jours et ∞ :

$$K(28) = 0,781 ; K_{fl} = 1,636$$

$$f(\infty - 28) = 1 - 0,109 = 0,8903$$

Pour calculer la perte due au fluage à l'infini, il faut prendre en compte les pertes totales à 28 jours : $P = \sigma_0(1 - \Delta\sigma_i (\%) - \Delta\sigma_{flu14} (\%)) A_p$

Tableau III.23: les pertes dues au fluage du béton de 28 à ∞ jours pour la précontrainte de poussage du tronçons 3

Section	Perte instant	P (kN)	M (kN.m)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu14}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu14}/\sigma_{p0}$ (%)
Culée 2	12,60	27923,90	0	7,52	56,83	3,82
Déviateur1	13,18	18531,38	21749,0773	4,92	37,16	2,50
Déviateur2	11,73	18779,01	-2673,9211	9,19	69,40	4,66
Appui 1	14,14	27309,75	-52564,6897	12,90	97,45	6,55
Déviateur1	12,82	18581,04	10953,5189	6,78	51,20	3,44
Déviateur2	10,50	19041,07	-1787,4785	9,16	69,18	4,65
Appui 2	14,21	27284,50	-54014,5282	13,05	98,56	6,62
Déviateur1	12,76	18600,41	14370,2167	6,21	46,88	3,15
Déviateur2	10,46	19055,94	669,735	8,75	66,07	4,44
Appui 3	14,16	27311,56	-49032,9484	12,53	94,64	6,36
Déviateur1	12,86	18562,64	7502,8212	7,36	55,57	3,73
Déviateur2	10,53	19029,29	-4344,8606	9,59	72,42	4,87
Appui 4	14,15	27302,27	-54377,0441	13,09	98,88	6,65
Déviateur1	12,53	18651,44	14683,3828	6,18	46,66	3,14
Déviateur2	10,97	18958,34	5149,2411	7,94	59,98	4,03
Appui 5	14,16	27290,56	-58274,3779	13,50	101,96	6,85
Déviateur1	12,62	18614,17	7882,8228	7,31	55,26	3,71
Déviateur2	10,95	18967,98	6634,9959	7,69	58,10	3,90
Appui 6	14,12	27314,54	-53848,5241	13,04	98,48	6,62
Déviateur1	12,61	18617,71	8424,5915	7,22	54,58	3,67
Déviateur2	11,03	18934,22	309,8607	8,75	66,11	4,44
Appui 7	14,18	27281,71	-60123,2507	13,69	103,42	6,95
Déviateur1	12,62	18616,01	8025,0737	7,29	55,08	3,70
Déviateur2	10,76	19036,15	18403,031	5,72	43,23	2,91
Appui 8	14,13	27347,44	-37927,4117	11,37	85,87	5,77

III.3.2.2.3 Pertes dues à la Relaxation des aciers :

$$\Delta\sigma_{rel} = \frac{6\rho_{1000}}{100} \left(\frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}} - u_0 \right) \sigma_{pi}(x) \quad (III. 50)$$

Pour les armatures très basse relaxation (TBR)

$$u_0 = 0.43 \quad \rho_{1000} = 2,5\% \quad f_{prg} = 1860 \text{ Mpa}$$

$\sigma_{pi}(x)$: La contrainte de tension en un point donné, en tenant compte de la perte des pertes instantanés

$$\sigma_{pi}(x) = \sigma_{po} (1 - \Delta\sigma_{pi} (\%)) \quad (III. 51)$$

Tableau III.24: les pertes dues à la relaxation des aciers pour la précontrainte de poussage du tronçons 3

Section	X(m)	σ_{bi} (Mpa)	$\Delta\sigma_{rel}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{rel}/\sigma_{p0}$ (%)
Culée 2	0	1300,48	54,4223351	3,66
Déviateur1	13,5	1291,95	53,2727691	3,58
Déviateur2	30,375	1313,52	56,1985826	3,78
Appui 1	40,5	1277,56	51,358923	3,45
Déviateur1	51,75	1297,30	53,9927426	3,63
Déviateur2	74,25	1331,69	58,7145451	3,95
Appui 2	85,5	1276,54	51,2244213	3,44
Déviateur1	96,75	1298,06	54,0951271	3,64
Déviateur2	119,25	1332,30	58,8000154	3,95
Appui 3	130,5	1277,26	51,3196265	3,45
Déviateur1	141,75	1296,62	53,9004625	3,62
Déviateur2	164,25	1331,31	58,6617511	3,94
Appui 4	175,5	1277,41	51,3387615	3,45
Déviateur1	188,25	1301,57	54,5700898	3,67
Déviateur2	213,75	1324,70	57,7404353	3,88
Appui 5	226,5	1277,28	51,3224053	3,45
Déviateur1	239,25	1300,15	54,3779191	3,65
Déviateur2	264,75	1325,11	57,7980404	3,88
Appui 6	277,5	1277,92	51,406683	3,45
Déviateur1	290,25	1300,31	54,3985826	3,66
Déviateur2	315,75	1323,85	57,6235107	3,87
Appui 7	328,5	1277,07	51,2943649	3,45
Déviateur1	341,25	1300,26	54,391977	3,66
Déviateur2	366,75	1327,82	58,1753739	3,91
Appui 8	379,5	1277,73	51,3817717	3,45

III.3.2.3 Les pertes totales des câbles de poussage

$$\Delta\sigma_{\text{tot}} = \Delta\sigma_{\text{pi}} + \Delta\sigma_{\text{pd}} \quad (\text{III.52})$$

$$\Delta\sigma_{\text{pd}} = \Delta\sigma_{\text{ret}} + \Delta\sigma_{\text{flu}} + \frac{5}{6\Delta\sigma_{\text{rel}}} \quad (\text{III.53})$$

Tableau III.25: les pertes totales pour la précontrainte de poussage du tronçons 3

Section	$\Delta\sigma_{\text{pi}}\%$	$\Delta\sigma_{\text{ret}}\%$	$\Delta\sigma_{\text{flu}}\%$	$5/6\Delta\sigma_{\text{rel}}\%$	$\%\Delta\sigma_{\text{pd}}$	Perte totale
Culée 2	12,60	1,09	3,82	3,05	7,96	20,56
Déviateur1	13,18	1,09	2,50	2,98	6,57	19,75
Déviateur2	11,73	1,09	4,66	3,15	8,90	20,63
Appui 1	14,14	1,09	6,55	2,88	10,52	24,66
Déviateur1	12,82	1,09	3,44	3,02	7,56	20,37
Déviateur2	10,50	1,09	4,65	3,29	9,03	19,53
Appui 2	14,21	1,09	6,62	2,87	10,58	24,80
Déviateur1	12,76	1,09	3,15	3,03	7,27	20,04
Déviateur2	10,46	1,09	4,44	3,29	8,83	19,29
Appui 3	14,16	1,09	6,36	2,87	10,33	24,49
Déviateur1	12,86	1,09	3,73	3,02	7,84	20,71
Déviateur2	10,53	1,09	4,87	3,29	9,24	19,77
Appui 4	14,15	1,09	6,65	2,88	10,61	24,77
Déviateur1	12,53	1,09	3,14	3,06	7,28	19,81
Déviateur2	10,97	1,09	4,03	3,23	8,36	19,33
Appui 5	14,16	1,09	6,85	2,87	10,82	24,98
Déviateur1	12,62	1,09	3,71	3,05	7,85	20,48
Déviateur2	10,95	1,09	3,90	3,24	8,23	19,18
Appui 6	14,12	1,09	6,62	2,88	10,59	24,71
Déviateur1	12,61	1,09	3,67	3,05	7,81	20,42
Déviateur2	11,03	1,09	4,44	3,23	8,76	19,79
Appui 7	14,18	1,09	6,95	2,87	10,91	25,09
Déviateur1	12,62	1,09	3,70	3,05	7,84	20,46
Déviateur2	10,76	1,09	2,91	3,26	7,26	18,02
Appui 8	14,13	1,09	5,77	2,88	9,74	23,87

III.4 Vérification de l'effort tranchant (8)

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.

Les efforts tranchants sont réduits aux appuis, en raison de la composant vertical de la précontrainte.

La vérification des contraintes tangentielles s'effectue pour les phases à vide et en charge

La contrainte tangentielle est donnée par la formule suivante

$$\tau_{red} = \frac{v_{red} \times S}{I \times b_n} \quad (III.54)$$

V_{red} : effort tranchant réduit

$$V_{red} = V_g + V_q - \sum P \sin(\alpha) \quad (III.55)$$

V_g : effort tranchant qui vient des charges permanentes.

V_q : effort tranchant qui vient des charges variables.

Effort de précontrainte $V_p = -P \sin(\alpha)$

S : moment statique par rapport à l'axe passant par le centre de gravité

b_n : largeur nette

I : le moment d'inertie de la section considérée

Pour la vérification : $\tau = \min \{ \tau_1, \tau_2 \}$

Avec

$$\tau_1^2 \leq 0,4 \times f_{tj} \times \left[f_{tj} + \frac{2}{3} (\sigma_x) \right] \quad (III.56)$$

$$\tau_2^2 \leq 2 \times \frac{f_{tj}}{f_{cj}} \times \left[0,6 \times f_{cj} - \sigma_x \right] \times \left[f_{tj} + \frac{2}{3} \sigma_x \right] \quad (III.57)$$

f_{tj} : la résistance de la traction du béton à l'âge j

f_{cj} : la résistance à la compression du béton à l'âge j

σ_x : la contrainte de la précontrainte appliquée

III.4.1 Calcul des contraintes de cisaillement limite :

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

Sur Appui de rive (la culée) :

$$P_c = 1.02 P_0 - 0.8 \Delta P_c = 2678,4 (1.02 - 0.8 \times 22,52\%) = 2249,388 \text{ Kn}$$

$$P_p = 1.02 P_0 - 0.8 \Delta P_p = 2678,4 (1.02 - 0.8 \times 21,27\%) = 2686,391 \text{ Kn}$$

ΔP_c : perte totale maximale de la précontrainte de continuité sur la culée

ΔP_p : perte totale maximale de la précontrainte de poussage sur la culée

$$\sigma_x = \frac{2249,388 \times 8 + 2686,391 \times 12}{6,8} = 7,387 \text{ Mpa}$$

$$\tau_1^2 = 9,51 \rightarrow \tau_1 = 3,083 \text{ Mpa}$$

$$\tau_2^2 = 19,74 \rightarrow \tau_2 = 4,44 \text{ Mpa}$$

$$\tau_{\text{lim}} = \min \{ \tau_1, \tau_2 \} = 3,083 \text{ Mpa}$$

Sur Appui intermédiaire (pile) :

$$P_c = 1.02 P_0 - 0.8 \Delta P_c = 2678,4 (1 - 0.8 \times 24.58\%) = 2205,287 \text{ Kn}$$

$$P_p = 1.02 P_0 - 0.8 \Delta P_p = 2678,4 (1 - 0.8 \times 25.09\%) = 2678,207 \text{ Kn}$$

ΔP_c : perte totale maximale de la précontrainte de continuité l'appuie

ΔP_p : perte totale maximale de la précontrainte de poussage sur l'appuie

$$\sigma_x = \frac{2205,287 \times 8 + 2678,207 \times 12}{6,8} = 6,532 \text{ Mpa}$$

$$\tau_1^2 = 8,826 \rightarrow \tau_1 = 2,97 \text{ Mpa}$$

$$\tau_2^2 = 18,329 \rightarrow \tau_2 = 4,28 \text{ Mpa}$$

$$\tau_{\text{lim}} = \min \{ \tau_1, \tau_2 \} = 2,97 \text{ Mpa}$$

III.4.1.1 Calcul des contraintes de cisaillements aux états limites de service :

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

$$\tau_{\text{red}} = \frac{v_{\text{red}}}{b_n \times Z} \quad (\text{III. 58})$$

Avec : $Z = \frac{I}{S}$

Tableau III.26: Calculs des contraintes de cisaillement aux états limites de service

	A vide		En charge	
	Culée	Pile	Culée	Pile
T (KN)	3978,728	6980,924	4869,810	8471,608
V_{red}(KN)	540,011	843,742	1477,296	2334,442
τ_{red} (Mpa)	0,476	0,743	1,301	2,057
Vérification	Vérifiée	Vérifiée	Vérifiée	Vérifiée

III.4.1.2 Calcul des contraintes de cisaillements aux états limite ultime :

Les contraintes de cisaillement à l'ELU sont données sur le tableau ci-dessous.

Tableau III.27: Calculs des contraintes de cisaillement aux états limites de service

	En charge	
	Culée	Pile
T (KN)	6563,429	11505,741
V_{red}(KN)	1097,296	5368,542
τ_{red} (Mpa)	0,967	4,730

III.4.2 Détermination de l'inclinaison des bielles :

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

$$\operatorname{tg} 2\beta_u = \frac{2\tau_u}{\sigma_{xu} - \sigma_{tu}} \quad (III.59)$$

σ_{xu} : la contrainte de la précontrainte appliquée longitudinale.

σ_{yu} : la contrainte de la précontrainte appliquée transversale. ($\sigma_{yu}=0$)

$$\operatorname{tg} 2\beta_u = \frac{2\tau_u}{\sigma_{xu}} = \frac{2 \times 4,73}{7,38} = 1.28$$

$$\beta_u = 26^\circ$$

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

$\rightarrow \operatorname{tg} \beta_u = 0,5773$

III.4.3 Détermination des armatures transversales :

Pour déterminer les armatures transversales on utilise la relation suivante :

$$\frac{A_t}{b_n \times S_t} \times \frac{f_e}{\gamma_s} \geq \left[\tau_{redu} - \frac{f_{tj}}{3} \right] \times \operatorname{tg} \beta_u \quad (III.60)$$

A_t : somme des aires de section droite des aciers d'un cours d'armatures transversales,

S_t : espacement de ces armatures

f_e : limite d'élasticité de l'acier

$$\frac{A_t}{S_t} \geq \frac{1,006 \times 1,15}{500} \times \left[4,73 - \frac{3}{3} \right] \times 0,5773 \times 10^2$$

$$\frac{A_t}{S_t} \geq 0.49 \text{ cm}$$

$$S_t \leq \operatorname{Min}[1m; 0.8h; 3b_0] = 1m$$

Pourcentage minimum :

$$\frac{A_t}{S_t} \geq \frac{0.4 \times \gamma_s \times b_n}{f_e} \quad (III.61)$$

$$\frac{A_t}{S_t} \geq \frac{0.4 \times 1,15 \times 1,006}{500} = 0.092 \text{ cm} \quad \text{vérifiés}$$

On prend 2 cadres HA25 pour chaque âme avec un espacement de $St = 20 \text{ cm}$. (9.8 cm^2)
 A noter que cette section ne correspond pas au ferrailage définitif. Une fois la section d'armature des âmes 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.

III.4.3.1 Justification du béton :

La contrainte de cisaillement τ_{redu} doit être :

$$\tau_{redu} \leq \frac{0.85 f_{cj}}{3 \gamma_b} \times \sin 2\beta_u \quad (III. 62)$$

En prenant pour inclinaison des bielles la valeur minimale :

$$4,73 \leq \frac{0.85 \times 40}{3 \times 1.5} \times \sin 2 \times 30$$

$$4,73 \leq 6.5554 \quad \text{Vérifié}$$

III.4.3.2 Vérification à la torsion

La torsion est un phénomène courant dans les ouvrages d'art. Elle est, la plupart du temps, négligée car difficile à appréhender, et parce que ses conséquences sont souvent sans importance. Dans le cas des ponts courbes, les efforts de torsion sont très importants, et ils doivent être justifiés pour éviter tous désagréments dans la structure.

La contrainte de cisaillement par torsion est donnée par la formule suivante :

$$\tau_{xy} = \tau_T = \frac{M_{xy}}{2 \Omega b_n} \quad (III. 63)$$

M_{xy} : moment de torsion maximum

Ω : l'aire délimitée par la ligne moyenne

$$M_{xy} = 1353,8 = 1,353 \text{ MN}$$

$$\Omega = 14,35 \text{ m}^2$$

$$\tau_{xy} = \frac{1.353}{2 \times 14,35 \times 1} = 0,0468 \text{ MPa}$$

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

$$\tau_{T_{ser}}^2 + \tau_{V_{ser}}^2 \leq \tau_{lim}^2 \quad (III. 64)$$

τ_T : contrainte tangentielle due au moment de torsion.

τ_V : contrainte tangentielle due à l'effort tranchant.

τ_{lim} : contrainte admissible de cisaillement.

$$(0,0468)^2 + (2,056)^2 \leq (2,97)^2$$

$4,232 \leq 8,82....$ **Condition vérifiée**

III.5 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.

CHAPITRE IV

FERRAILLAGE DE LA SECTION TRANSVERSALE

IV.1 Introduction :

L'objectif principal de l'étude ici présente est la détermination des armatures passives dans le voussoir courant soigneusement prédimensionné, celles-ci constituent un élément crucial dans le rôle de la résistance fondamentale et leurs durabilités.

Pour ce faire, étant donné la complexité de l'ouvrage, nous allons subdiviser le voussoir en 3 sections distinctes afin de calculer le ferraillage nécessaire..

- Section 1 : hourdis supérieur

- Section 2 : les âmes

- Section 3 : l'hourdis inférieur

IV.2 Calcul des Sollicitations

La modélisation de notre voussoir s'est faite à l'aide du Logiciel Midas civil. En effet, pour avoir des résultats favorables nous avons choisi de modéliser le caisson en tant que portique bi-appuyé aux extrémités des âmes à l'aide d'appuis double, où nous avons considéré la largeur de celui-ci étant de 1m.

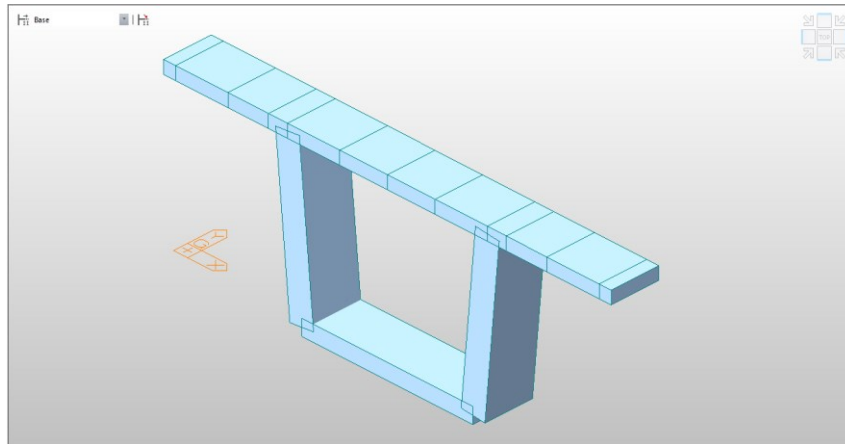


Figure IV.2: Caisson modélisé sur Midas civil (vue 3D)

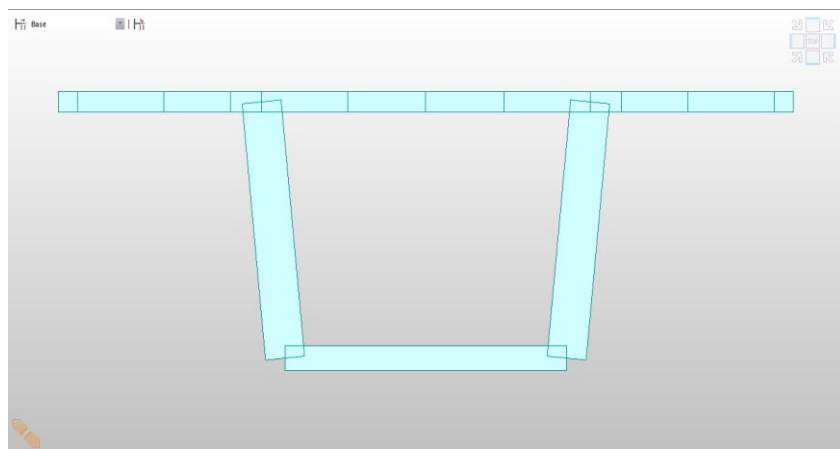


Figure IV.1: Caisson modélisé sur Midas civil (vue 2D)

Pour une largeur de 1m le caisson sera soumis aux charges suivantes :

	Surcharges (sur une largeur de 1m)	Valeurs
Charges permanentes	Rail et traverses de voie	10 kN/ml
	Passage	10,9kN/ml
	Plateforme en béton	2,8kN/ml
	Corniche	78kN/ml
Poids propre	Poids propre du voussoir	18,1kN/ml
Charge d'exploitation	Charges sur quais	10 kN/m ²
Charges roulantes	UIC71*α*Φ_2	Figure IV.3

IV.2.1 Charges dues au Trafic :

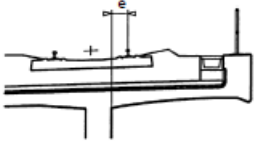
La surcharge UIC71 appliquée sur la dalle de la poutre caisson est multipliée par le coefficient dynamique Φ_2 associé à l'étude transversale.

En tenant compte de la diffusion des charges longitudinalement et transversalement.

Sachant que nous avons considéré la largeur de la section égale à 1m,

Il nous faut chercher la charge liée au trafic la plus défavorable.

Tableau IV.1: Longueur déterminante pour l'étude transversale (4)

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  <i>Fig. 3 - Porte-à-faux transversal supportant les charges ferroviaires</i> - $e \leq 0,5 \text{ m}$: 3 fois l'espacement 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'espacement entre pièces de pont
4.3	Dalle pour ponts à poutres latérales et ponts à augets : - effet porteur perpendiculaire aux poutres principales, - effet porteur dans le sens longitudinal	2 fois la portée de la dalle de tablier + 3 m 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

$$L_\Phi = 3 \times 9,4 = 28,2 \text{ m} \rightarrow \Phi_2 = 1,1$$

- En multipliant par le coefficient de majoration dynamique :

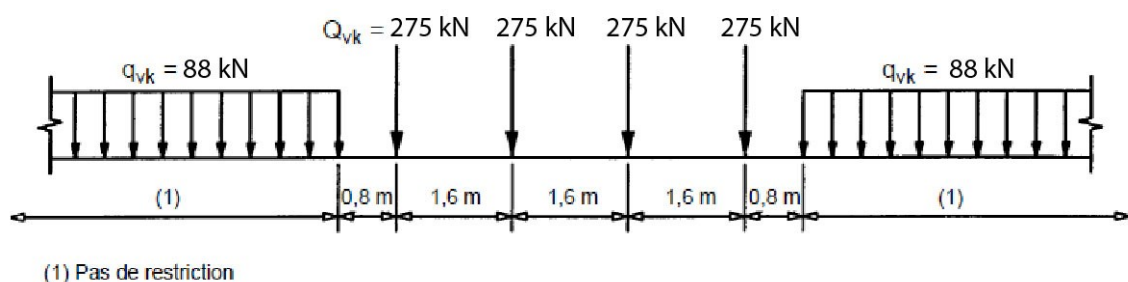


Figure IV.3 Modèle de charge UIC 71 avec la majoration des efforts

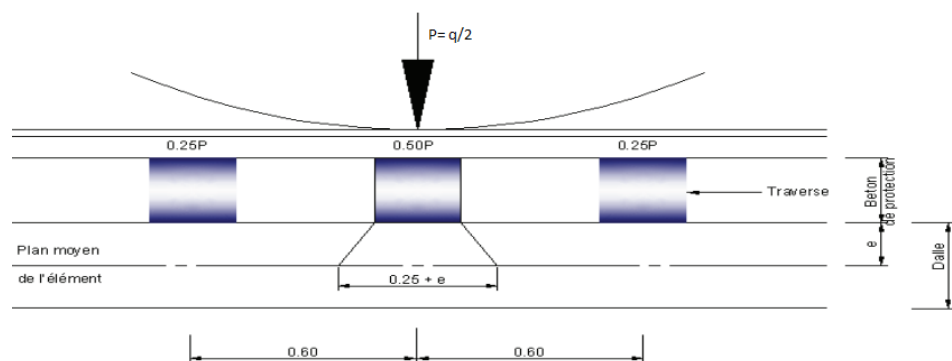


Figure IV.4: Répartition de la charge longitudinalement

IV.2.2 Combinaison de charges

Le tableau ci-dessous montre les combinaisons de charges utilisées pour les calculs des sollicitations.

Tableau IV.2: 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	$G + UIC 71 + 0.8 AQS$

IV.2.3 Les résultats obtenus :

Les figures ci-dessous représentent les diagrammes du moment fléchissant, de l'effort tranchant, et de l'effort normal, soumis aux combinaisons de charges :

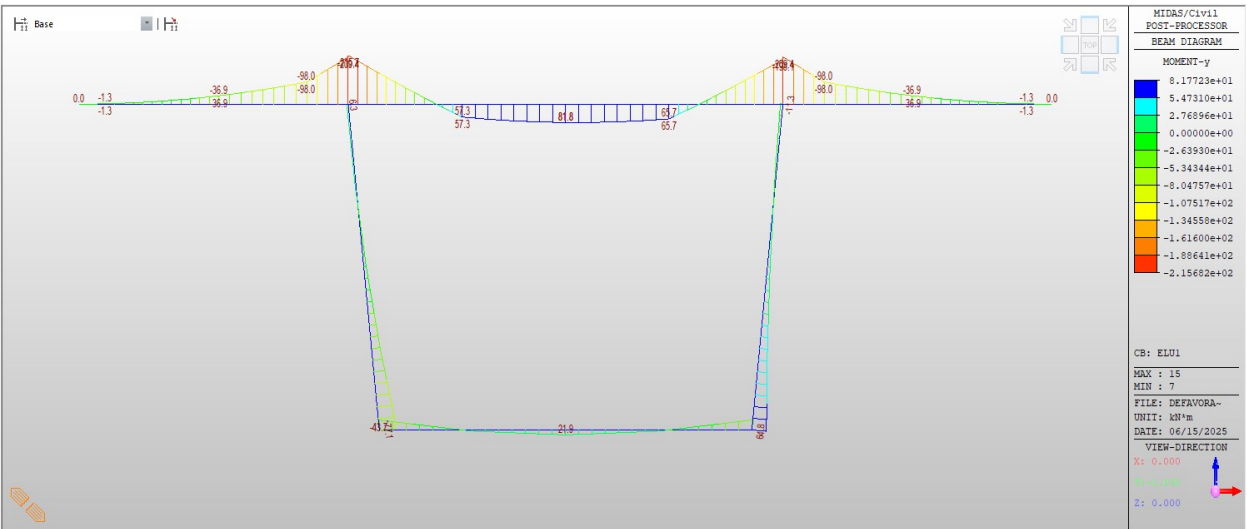


Figure IV.5: Moment fléchissant a l'ELU

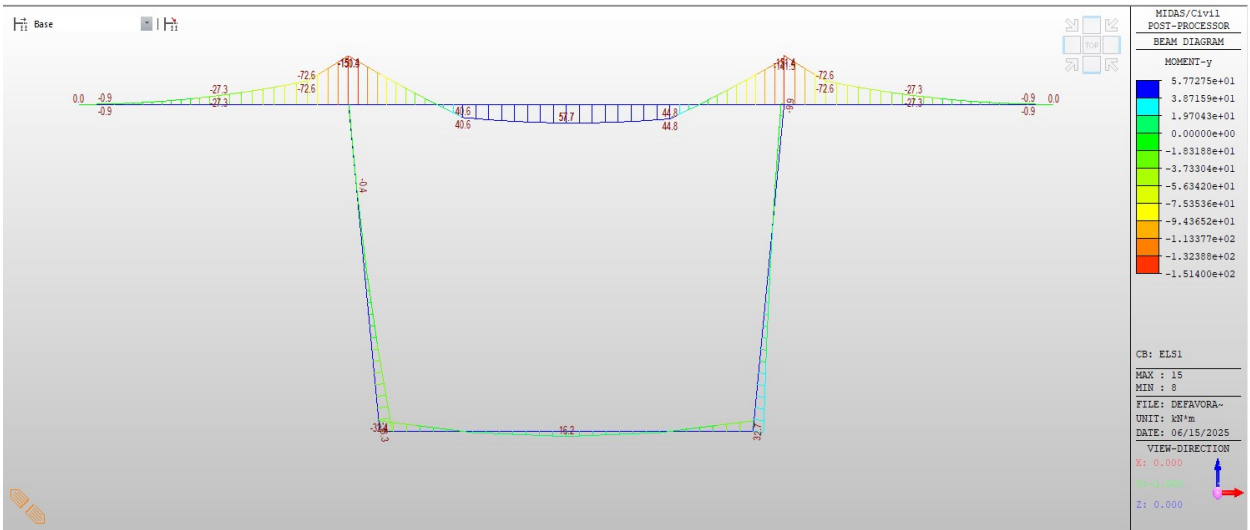


Figure IV.6: Moment fléchissant a l'ELS

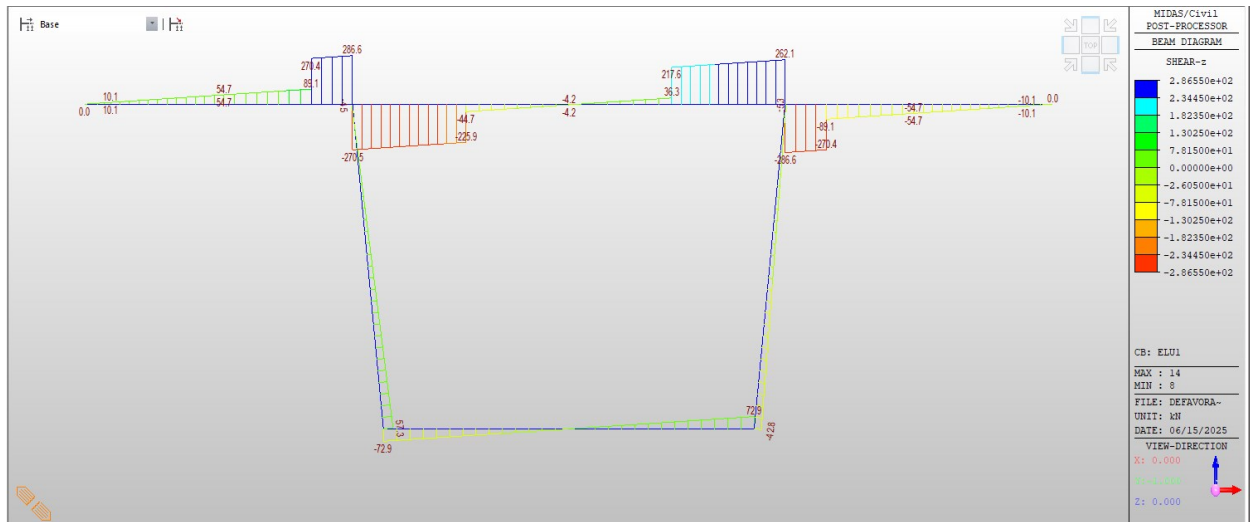


Figure IV.7: Effort tranchant a l'ELU

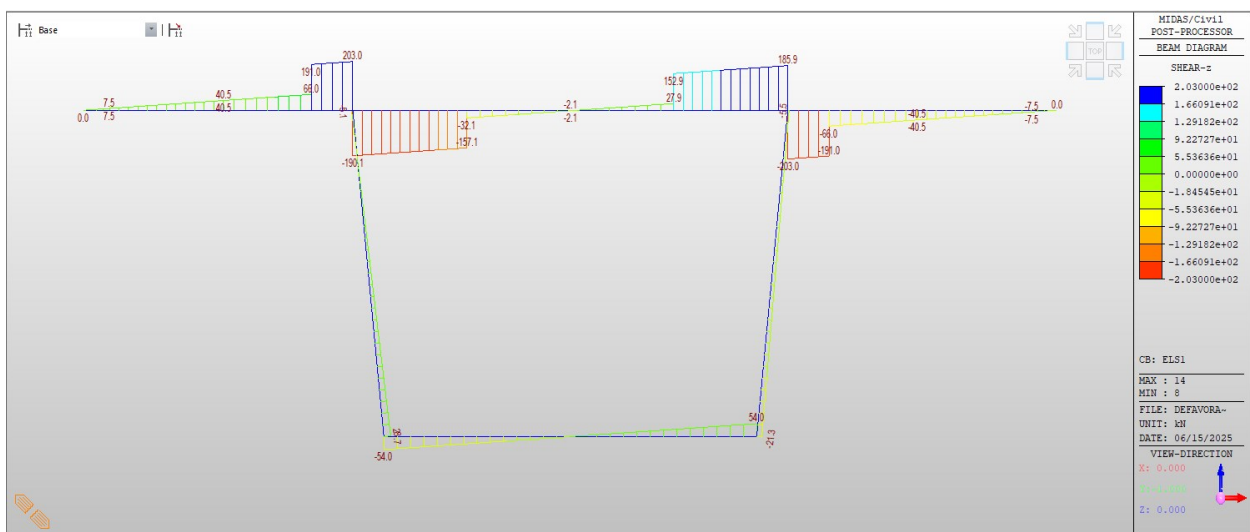


Figure IV.8: Effort tranchant a l'ELS

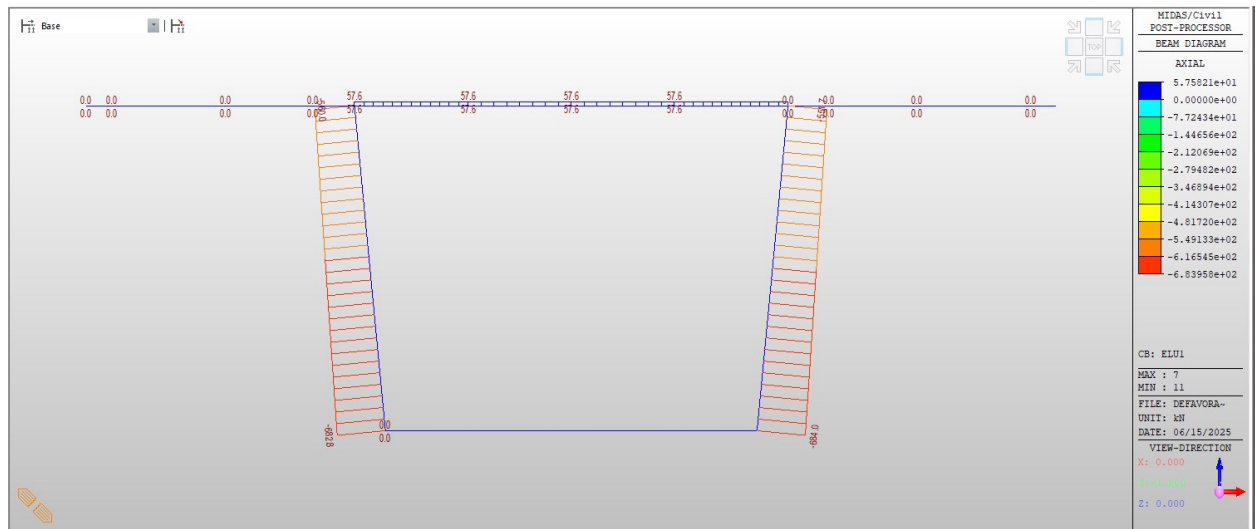


Figure IV.9: Effort normal a l'ELU

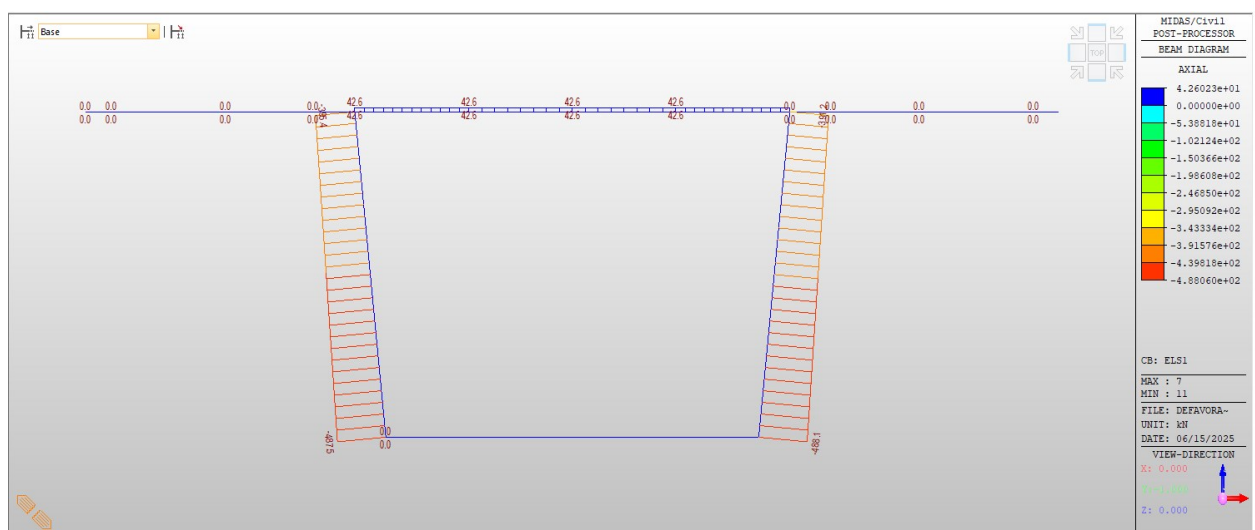


Figure IV.10: Effort normal a l'ELS

Seulement les efforts maximums sous les combinaisons les plus défavorables sont présentés dans tableaux ci-dessous

- **Sollicitations en flexion simple :**

Tableau IV.3: Sollicitations en flexion simple

	ELU		ELS	
Section	$M_{\max}$ (kN.m)	$M_{\min}$ (kN.m)	$M_{\max}$ (kN.m)	$M_{\min}$ (kN.m)
Hourdis supérieur	81.8 ELU Fondamental	-210 ELU Fondamental	53,7 ELS rare	-149 ELS rare
Porte à faux	0 ∀ cas de charge	-210 ELU rare	0 ∀ cas de charge	--149 ELS rare
Hourdis inférieure	21.9 ELU Fondamental	-43 ELU Fondamental	57 ELS rare	-113.4 ELS rare

- **Sollicitations en flexion composée :**

Tableau IV.4: Sollicitations en flexion composée

	ELU			ELS		
Sections	$N_{\max}$ (kN)	$M_{\max}$ (kN.m)	$M_{\min}$ (kN.m)	$N_{\max}$ (kN)	$M_{\max}$ (kN.m)	$M_{\min}$ (kN.m)
Âme	684 ELU fondamental	64.8 ELU statique	-77.1 ELU fondamental	488.1 ELS rare	32.7 ELS Rare	-33.3 ELS rare

IV.3 Calcul du ferrailage :

La justification des pièces et la détermination du ferrailage se fait selon les indications du BAEL 91 révisé 99, en considérant généralement les fissurations comme très préjudiciable (9).

Pour les armatures longitudinales on prend généralement $\frac{A_s}{3}$ (disposition constructives)

-hourdis supérieurs, l'hourdis inférieur et les deux porte-à-faux travaillant en flexion simple.

-les âmes sont soumises à une flexion composée.

On a un enrobage de 4,25 cm, $d'=4,25\text{cm}$

La condition de non-fragilité est donnée par la formule : (9)

$$A_{\min} \geq 0,23 \times \frac{b \times d \times f_{t28}}{f_e} \quad (IV.1)$$

IV.3.1 Ferrailage des hourdis et de porte-à-faux

Les sections des aciers passifs sont données dans le tableau suivant.

Tableau IV.5: Section des aciers passifs pour les hourdis et le porte-à-faux

	Transversale		Longitudinales	
Section	$A_{s_{inf}}$ (cm ²)	$A_{s_{sup}}$ (cm ²)	A_{sl} (cm ²)	A_{min} (cm ²)
Hourdis supérieur	11.7	20.7	6.9	3.9
Porte à faux	2.86	34.3	11.43	2.86
Hourdis inférieur	12.5	25.9	8.63	3.9

IV.3.1.1 La distribution d'armature :

Les armatures sont distribuées comme suit :

Tableau IV.6: Récapitulatif sur les sections des aciers passifs des hourdis et de porte-à-faux

	Nombre de barres	
Sections	Nappe supérieure	Nappe inférieure
Hourdis supérieur	10HA16/ml	6HA16/ml
Porte à faux	7HA25/ml	2HA14/ml
Hourdis inférieur	8HA20/ml	4HA20/ml

IV.3.2 Ferrailage des âmes :

Les sections des aciers passifs pour les âmes sont données dans le tableau suivant

Tableau IV.7: Section des aciers passifs pour les âmes

	Transversale		Longitudinales	
Section	$A_{s_{inf}}$ (cm ²)	$A_{s_{sup}}$ (cm ²)	A_{sl} (cm ²)	A_{min} (cm ²)
Âme	6.31	6.31	6.31	6.31

IV.3.2.1 La distribution d'armature :

Les armatures sont distribuées comme suit :

Tableau IV.8: Récapitulatif sur les sections des aciers passifs des âmes

	Nombre de barres	
Sections	Nappe supérieure	Nappe inférieure
Âme	4HA16/ml	4HA16/ml

IV.4 Conclusion :

Les caissons sont les poutres les plus utilisées lors de la conception d'ouvrage construit par poussage ou encorbellement successif, il est naturel de s'attarder sur leur prédimensionnement ainsi que le ferraillage de celui-ci, malgré sa complexité, il existe toujours des solutions à leurs ferraillages en revenant aux bases du Béton armé, la subdivision de celui-ci en plusieurs parties en prenant les efforts agissants sur chaque partie, a été la solution la plus simple à mettre en œuvre.

CHAPITRE

V

ETUDE DE LA PILE

V.1 Introduction :

L'étude de l'infrastructure d'un ouvrage est l'une des options fondamentales du projet. Elle a pour rôle de transmettre les efforts provenant des charges et surcharges jusqu'au sol. Un appui (pile) est défini essentiellement par ses caractéristiques géométriques et mécaniques. Ses caractéristiques doivent répondre aux exigences du franchissement. Durant ce chapitre on va se focaliser sur l'étude des piles ainsi que des améliorations à apporter à celles-ci.

V.2 Conception de la pile :

Cette partie va être subdivisée en deux parties, en premier lieu nous allons étudier la pile selon les conditions du projet, et en deuxième partie nous allons changer la section de celle-ci pour éventuellement apporter une certaine amélioration.

V.2.1 Piles à sections pleines :

Celles-ci seront réparties comme suit :

- Les piles P-1 à P-30, section rectangulaire $b= 2.5m$, $h= 5.5m$.
- Les piles P-31 à P-34, section circulaire $D= 3.5m$.

V.2.1.1 Vérification des piles au flambement :

-Section rectangulaire 2.5mx5.5m (9) :

La pile la plus haute est la pile P-17 avec une hauteur de $h = 18,75m$.

$$l_f = 0,7 \times 18,75m = 13,125m$$

$$I = \frac{hb^3}{12} = 34,66m^4$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} = \sqrt{\frac{34,6}{13,75}} = 1,59m$$

$$\lambda = \frac{l_f}{i} = \frac{13,125}{1,59} = 8,25 \leq 70 \rightarrow \text{la condition est vérifiée pas de risque de flambement}$$

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

-Pour un section circulaire $D= 3,5m$:

La pile la plus haute est la pile P-31 avec une hauteur de $h = 15,35m$

$$l_f = 0,7 \times 15,35m = 10,745m$$

$$I = \frac{\pi D^4}{64} = 7,37m^4$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{7,87}{9,62}} = 0.875m$$

$$\lambda = \frac{l_f}{i} = \frac{10,745}{0,875} = 12,28 \leq 70 \rightarrow \text{la condition est vérifiée pas de risque de flambement}$$

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

V.2.1.2 Etude sismique :

Caractéristiques de l'ouvrage relatives à l'étude sismique (6):

- Le présent pont est de 1er groupe, classé en zone VI.
- Le sol est de catégorie S4 (site très meuble).
- L'accélération de zone A = 0.40.

V.2.1.2.1 Méthode d'analyse

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser l'étude sismique pour les ouvrages d'art.

Parmi les plus utiliser (6) :

- L'analyse spectral monomodale
- Méthode du spectre de réponse. (Analyse dynamique linéaire)

Dans notre cas de figure, certaines conditions nous empêchent d'utiliser l'analyse spectrale monomodale, donc notre choix se penchera naturellement sur la méthode du spectre de réponse.

V.2.1.2.2 Méthode du spectre de réponse :

L'analyse par le spectre de réponse (analyse dynamique linéaire) est une analyse élastique des réponses dynamiques maximales de tous les modes significatifs de la structure. La méthode se base sur un calcul dynamique multimodal spectral et tient compte de façon statique des déplacements différentiels. La réponse globale est obtenue par des combinaisons statistiques des contributions modales maximales. Tous les modes qui ont une contribution importante à la réponse structurale totale doivent être pris en compte.

A l'aide de notre modélisation 3d CSI Bridge, nous allons procéder à l'estimation des efforts dues aux efforts sismiques selon certaines combinaisons que nous allons voir par la suite.

Pour introduire les efforts de séisme nous avons utilisé les spectres de réponses suivant (6)

V.2.1.2.3 Le spectre de dimensionnement :

L'utilisation du spectre de dimensionnement pour les deux composantes horizontales pour le calcul de la résistance.

C'est une approche du comportement inélastique par un calcul élastique équivalent. (6)

$$S_{ad}(T, \xi) = \begin{cases} 2.5\eta Ag S & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta Ag S \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta Ag S \left(\frac{T_2}{3.0}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3.0}{T}\right)^{\frac{5}{3}} & T \geq 3.0s \end{cases}$$

Avec :

η : Facteur d'amortissement définis par : $\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$

g : accélération de la pesanteur ($=9,81\text{m/s}^2$)

T_2 : période caractéristique

S : coefficient de site

A : l'accélération de Zone

ξ : taux d'amortissement

Tableau V.1: valeurs des périodes caractéristiques et le coefficient selon le site

Site	S1	S2	S3	S4
T_1	0,15	0,15	0,20	0,20
T_2	0,30	0,40	0,50	0,70
S	1	1,1	1,2	1,3

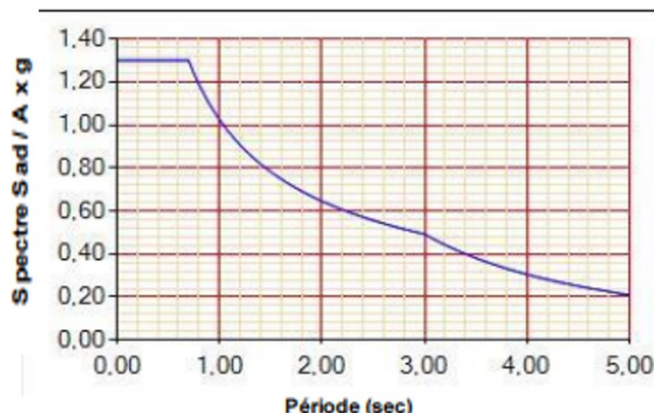


Figure V.1: spectre de dimensionnement horizontales $\xi = 5\%$

V.2.1.2.4 Le spectre de réponse vertical (6):

$$S_{ae}^v(T) \text{ (m/s}^2\text{)} = \begin{cases} \alpha A g \left(1 + \frac{T}{T_1} (2.5\eta - 1) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\alpha A g \eta & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\alpha A g \eta \left(\frac{T_2}{T} \right) & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\alpha A g \eta \left(\frac{3T_2}{T^2} \right) & T \geq 3.0s \end{cases}$$

Avec

η : Facteur d'amortissement définis par : $\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$

g : accélération de la pesanteur ($=9,81\text{m/s}^2$)

T_2 : période caractéristique

S : coefficient de site

A : l'accélération de Zone

α : coefficient qui tient compte de l'importance de la composante verticale en zone de forte sismicité.

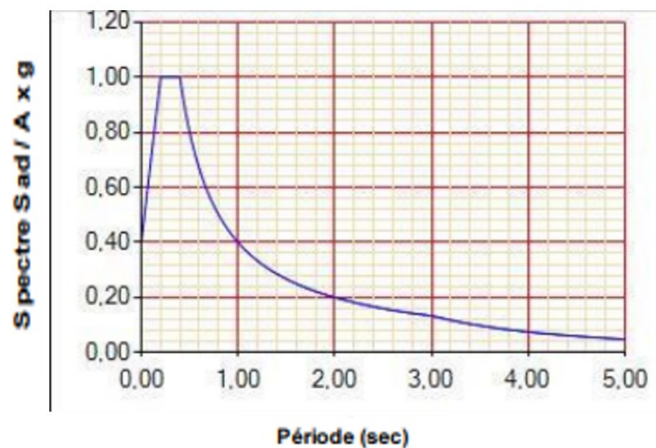


Figure V.2spectre de dimensionnement verticale $\xi = 5\%$

V.2.1.2.5 Les périodes propres

Les résultats des modes de déformations sont montrés dans l'annexe D.

- $T = 2,078s$ pour le sens transversal
- $T = 1,93 s$ pour le sens longitudinal

Nous remarquons qu'après 60 modes nous ne retrouvons pas 90% de répartition massique, C'est-à-dire que l'ouvrage est trop lourd.

V.2.1.2.6 Combinaison des composantes de l'action sismique :

L'effet probable de l'action maximale est défini selon les combinaisons suivantes (6) :

$$E' = E_x \pm 0.3 E_y \pm 0.3 E_z$$

$$E' = E_y \pm 0.3 E_x \pm 0.3 E_z$$

$$E' = E_z \pm 0.3 E_x \pm 0.3 E_y$$

Avec : E_x , E_y et E_z sont les effets des actions sismiques dans chacune des directions respectives X, Y et Z.

V.2.1.2.7 Evaluations des efforts à la base des piles :

Les combinaisons d'action sur les piles sont

- ELU fondamentales : $1,35 G + 1,45 Gr_{22} + 1,2 AQS$
- ELS rare : $G + Gr_{22} + 0,8 AQS$
- ELA : $G + E' + \Psi Q$

Avec Ψ : 0.3 pour les charges ferroviaires.

E' : L'effet probable de l'action maximale.

Les résultats dues à ces efforts sont donne dans l'annexe D

V.2.1.2.8 Coefficient réducteur des efforts

Le rpoa 2008, Préconise un facteur réducteur des efforts pour éviter toute plastification au niveau des aciers longitudinaux. (4.4 du Rpoa 2008)

Les piles en béton armé $q_0 = 1 + \frac{0,5}{k} \cdot \frac{l}{h}$

$k = 1$ pour les piles encastrées d'un seul coté

l : est la hauteur de pile

h : est la hauteur de la section transversale suivant la direction du séisme

V.2.1.2.9 Dimensionnement en capacité des piles pour les efforts

transversaux et longitudinaux :

La valeur de base ci-dessus est corrigée pour tenir compte de l'effort normal dans les appuis en béton armé. On définit l'effort normal réduit concomitant :

$$v = \sigma_{cm} / f_{cd90}$$

σ_{cm} : la compression moyenne sous l'effort normal de calcul

f_{cd90} : la résistance en compression du béton à 90 jours.

Le coefficient de comportement vaut alors :

$$\begin{aligned} q &= q_0 & \text{si} & \quad v \leq 0,3 \\ q &= q_0 - (10/3) (v - 0,3) (q_0 - 1) & \text{si} & \quad 0,3 < v \leq 0,6 \\ q &= 1 & \text{si} & \quad v > 0,6 \end{aligned}$$

Dans notre cas, pour toutes les piles, la valeur est de $v \leq 0,3$ donc $q = q_0$.

Selon RPOA, dimensionnement en capacité des piles pour les efforts transversaux et longitudinaux :

M_{sd} est le diagramme des moments dans les appuis issus du calcul utilisant le spectre de dimensionnement $S_{ad}(T)$. Dans la conception en capacité, pour les structures à

comportement ductile, on divise ces moments par le coefficient de comportement q défini en 4.4 :

$$M_{rd} = M_d / q$$

Les rotules plastiques se forment en pied de pile, ou éventuellement en tête (en cas d'encastrement dans le tablier), là où la valeur du moment fléchissant atteint son maximum.

Des zones critiques englobent les zones de rotule plastique qui s'étendent à partir de l'encastrement sur une longueur l_c qui est la plus grande des deux valeurs :

$$l_c = \lambda h$$

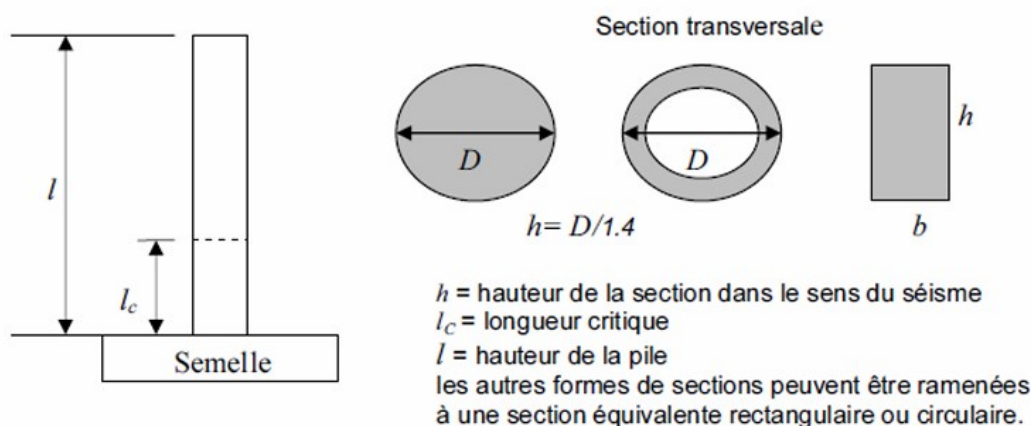
$$\text{Où } \lambda = (1/3) (2 + l/h) \text{ avec } 1 \leq \lambda \leq 2$$

Avec

l : la longueur de l'élément en béton

h : la hauteur de sa section transversale.

La longueur sur laquelle le moment (résultant du calcul élastique avec spectre de dimensionnement) est comprise entre $0,8 * M_{max}$ et M_{max}'



V.2.1.3 Ferrailage dans la zone critique

Dans cette zone critique, on dimensionne le ferrailage longitudinal pour la valeur de M_{rd} et l'effort normal concomitant le plus défavorable.

Il est important de ne pas surdimensionner le ferrailage longitudinal de façon que la rotule plastique se produise bien dans la zone critique et pas ailleurs.

En dehors de la zone critique, les dispositions constructives sont moins conséquentes et ont pour but d'assurer qu'aucune rotule plastique ne s'y forme. C'est pourquoi, il y a lieu de multiplier M_{sd} en dehors des zones critiques, par un coefficient de "surcapacité" γ_s qui est d'autant plus grand que le comportement inélastique prévisible (q) est grand :

$$\gamma_s = 0,8 + 0,2q \quad \text{pour le béton}$$

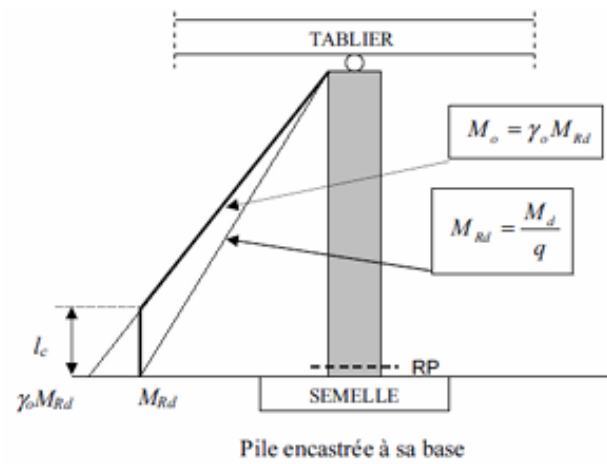


Figure V.3 formation de rotule plastique sur les piles

Tableau V.2caractéristique des piles et facteur réducteurs des efforts

Piles	Hauteur des piles (m)	q_0	γ_0	l_c
P-1	12,55	2,14	1,23	7,85
P-2	13,7	2,25	1,25	8,23
P-3	14,2	2,29	1,26	8,4
P-4	16	2,45	1,29	9
P-5	16,5	2,50	1,3	9,17
P-6	16,7	2,52	1,3	9,23
P-7	17,1	2,55	1,31	9,37
P-8	17,4	2,58	1,32	9,47
P-9	17,4	2,58	1,32	9,47
P-10	17,4	2,58	1,32	9,47
P-11	17,4	2,58	1,32	9,47
P-12	17,4	2,58	1,32	9,47
P-13	17,4	2,58	1,32	9,47
P-14	18,5	2,68	1,34	9,83
P-15	18,4	2,67	1,33	9,8
P-16	18,6	2,69	1,34	9,87
P-17	18,75	2,7	1,34	9,92
P-18	18,2	2,65	1,33	9,73
P-19	18,35	2,67	1,33	9,78
P-20	18,4	2,67	1,33	9,8
P-21	18,35	2,67	1,33	9,78
P-22	18,45	2,68	1,34	9,82
P-23	18,45	2,68	1,34	9,82
P-24	18,16	2,65	1,33	9,72
P-25	17,93	2,63	1,33	9,64
P-26	17,72	2,61	1,32	9,57
P-27	16,47	2,5	1,3	9,16
P-28	14,23	2,29	1,26	8,41
P-29	12,79	2,17	1,23	7,96
P-30	12,85	2,16	1,23	7,92
P-31	15,35	3	1,4	6,78
P-32	14,05	3	1,4	6,35
P-33	12,25	2,7	1,35	5,75
P-34	10,45	2,49	1,3	5,15

V.2.1.3.1 Tableau récapitulatif des efforts les plus défavorables.

Les combinaisons les plus défavorables sont naturellement les combinaisons a l'ELA

Plus précisément l'effort sismique dans le sens longitudinal, et dans le sens transversal sont les deux combinaisons qui génèrent les moments les plus grand,

Ainsi l'effort sismique longitudinale produit un moment défavorable M_y , et l'effort sismique transversal produit un moment défavorables M_x .

Tableau V.3 récapitulatif des efforts les plus défavorables.

Piles	Effort normal N (kN)	Moment fléchissant Mx (kN.m)	Moment fléchissant My (kN.m)	Moment fléchissant réduit Mdx (kN.m)	Moment fléchissant réduit Mdy (kN.m)
Pile 1	15239.225	89980.7241	117896.6964	73155,06024	95850,97268
Pile 2	15618.06	108216.4479	117234.3397	86573,15832	93787,47176
Pile 3	16065.444	115124.5937	117285.8313	91368,72516	93083,9931
Pile 4	14791.297	106340.4553	117287.9133	82434,46147	90920,86302
Pile 5	12827.397	96500.123	117106.6209	74230,86385	90082,01608
Pile 6	12010.831	93534.9701	117354.813	71949,977	90272,93308
Pile 7	16527.493	92170.6815	117722.1562	70359,29885	89864,24137
Pile 8	18989.803	109621.1324	118488.7983	83046,31242	89764,24114
Pile 9	18486.816	126220.5978	119648.4857	95621,665	90642,7922
Pile 10	18611.526	134840.8759	119657.0937	102152,1787	90649,31341
Pile 11	18580.762	139892.9987	118951.0005	105979,5445	90114,39432
Pile 12	18588.063	143572.2279	118574.382	108766,8393	89829,07727
Pile 13	18587.508	144861.2755	117753.0198	109743,3905	89206,83318
Pile 14	18582.648	141120.4107	117115.67	105313,7393	87399,75373
Pile 15	18602.838	135530.7109	116773.6919	101902,7902	87799,76835
Pile 16	18522.5	130106.2141	117514.7636	97094,18963	87697,58478
Pile 17	18824.195	124326.5852	116796.1885	92781,03373	87161,3347
Pile 18	19748.264	114763.6108	114252.7624	86288,42917	85904,33263
Pile 19	17223.579	97872.6145	108590.9504	73588,43195	81647,33113
Pile 20	13040.927	93927.7776	106448.5646	70622,38917	80036,51474
Pile 21	14634.887	92287.0644	104547.5625	69388,77023	78607,18985
Pile 22	12888.707	93418.6674	104293.3223	69715,42343	77830,83754
Pile 23	17639.571	98409.5019	105877.0538	73439,92679	79012,72672
Pile 24	18402.284	105309.3352	108665.27	79179,95128	81703,21053
Pile 25	15734.678	102180.2682	109521.3258	76827,26932	82346,8615
Pile 26	15917.487	100959.0409	111012.254	76484,12189	84100,19242
Pile 27	17871.72	105776.4061	113514.3189	81366,46623	87318,70685
Pile 28	19586.5	123696.2374	117583.6593	98171,61698	93320,36452
Pile 29	19142.903	140271.0522	119616.2316	114041,5059	97248,96878
Pile 30	19455.938	146942.0003	118063.7258	119465,0409	95986,76894
Pile 31	16312.681	103782.8311	89618.1531	74130,59364	64012,9665
Pile 32	15377.53	96059.7991	87600.7749	68614,14221	62571,98207
Pile 33	15483.952	82983.2466	84710.0926	61469,07156	62748,21674
Pile 34	16204.572	67030.992	86270.161	51562,30154	66361,66231

V.2.1.3.2 Calcul du ferrailage des piles :

Pour procéder aux ferrillages des piles nous allons donc nous munir des efforts les plus défavorables, et calculer la section de ferrailage de chaque pile en utilisant les logiciel Socotec, les sections des piles, rectangulaire et circulaire seront soumises à la flexion composée N-Mdx et N-Mdy

On considère les armatures comme étant symétriques étant donné que les valeurs max et min sont de signe opposé. (Toutes les valeurs seront dans les annexes D)

Tableau V.4 section d'acier et nombre de barres

Piles	Effort normal N (kN)	Moment fléchissant My (kN.m)	As1 (cm²)	Barres HA32	Moment fléchissant Mx (kN.m)	As2 (cm²)	Barre HA32	Section d'acier totale (cm²)
Pile 1	15239.225	95850,97268	865	107	73155,06024	157	19	2044
Pile 2	15618.06	93787,47176	837	104	86573,15832	216	27	2106
Pile 3	16065.44	93083,9931	824	102	91368,72516	234	29	2116
Pile 4	14791.297	90920,86302	809	100	82434,46147	205	25	2028
Pile 5	12827.397	90082,01608	816	101	74230,86385	187	23	2006
Pile 6	12010.831	90272,93308	825	102	71949,977	185	23	2020
Pile 7	16527.493	89864,24137	781	97	70359,29885	130	16	1822
Pile 8	18989.803	89764,24114	760	94	83046,31242	165	20	1850
Pile 9	18486.816	90642,7922	774	96	95621,665	230	28	2008
Pile 10	18611.526	90649,31341	774	96	102152,1787	261	32	2070
Pile 11	18580.762	90114,39432	767	95	105979,5445	280	35	2094
Pile 12	18588.063	89829,07727	764	95	108766,8393	293	36	2114
Pile 13	18587.508	89206,83318	756	94	109743,3905	298	37	2108
Pile 14	18582.648	87399,75373	734	91	105313,7393	277	34	2022
Pile 15	18602.838	87799,76835	739	91	101902,7902	260	32	1998
Pile 16	18522.5	87697,58478	738	91	97094,18963	237	29	1950
Pile 17	18824.195	87161,3347	729	90	92781,03373	213	26	1884
Pile 18	19748.264	85904,33263	706	87	86288,42917	173	21	1758
Pile 19	17223.579	81647,33113	677	84	73588,43195	138	17	1630
Pile 20	13040.927	80036,51474	695	86	70622,38917	168	21	1726
Pile 21	14634.887	78607,18985	664	82	69388,77023	145	18	1618
Pile 22	12888.707	77830,83754	671	83	69715,42343	165	20	1672
Pile 23	17639.571	79012,72672	642	79	73439,92679	133	16	1550
Pile 24	18402.284	81703,21053	667	83	79179,95128	153	19	1640
Pile 25	15734.678	82346,8615	698	86	76827,26932	169	21	1734
Pile 26	15917.487	84100,19242	717	89	76484,12189	165	20	1764
Pile 27	17871.72	87318,70685	739	91	81366,46623	168	21	1814
Pile 28	19586.5	93320,36452	798	99	98171,61698	232	29	2060
Pile 29	19142.903	97248,96878	851	105	114041,5059	314	39	2330
Pile 30	19455.938	95986,76894	833	103	119465,0409	338	42	2342
Pile 31	16312.681	64012.9665		92	74130.59364	1873.9	233	1102
Pile 32	15377.53	62571,98207		91	68614,14221	1696,9	211	988,42
Pile 33	15483.952	62748,21674	1495,9	186	61469,07156			853,59
Pile 34	16204.572	66361,66231	1604,5	200	51562,30154			923,12

Condition de non-fragilité :

$$A_{smin} \geq 0,23 \times \frac{h \times b \times f_{tj}}{f_e} = 151,8 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{La condition est vérifiée.}$$

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{c28} = 2,4 \text{ MPa}$$

V.2.1.3.3 Armature Transversale :

Espacement des armatures d'effort tranchant :

L'espacement maximum des armatures d'effort tranchant devra satisfaire les conditions suivantes :

$$S_{t, \max} \leq \text{Min} \{24 \Phi_t ; 8 \Phi_L ; 0,25d\} = 25,6\text{cm}$$

Avec

d : hauteur utile. ($d=0,9h = 4,95\text{m}$)

$\Phi_L = 32\text{mm}$.

Φ_t : diamètre des armatures transversales, $\Phi_t = 16\text{mm}$ ($\Phi_t \geq \Phi_L/3$)

Section minimale des armatures d'effort tranchant :

La section A_t du brin ou des brins d'une armature transversale assurant le maintien d'une barre longitudinale ou d'un groupe de barres de section A_L , doit satisfaire la relation suivante :

$$A_t \geq (A_L \cdot f_{el}) \cdot S_t / (16 \times f_{et}) \cdot 100$$

Avec :

S_t : Espacement des armatures transversales.

A_L : Section totale des armatures longitudinales.

f_{el}, f_{et} : Caractéristiques de l'acier des armatures respectivement longitudinales et transversales.

On prend:

$S_t = 7\text{cm}$.

$A_L = 2342\text{cm}^2$.

$f_{el} = f_{et} = 500\text{MPa}$.

$$A_t = A_{t, \min} = 102.46 \text{ cm}^2 \Rightarrow 51\text{HA16}$$

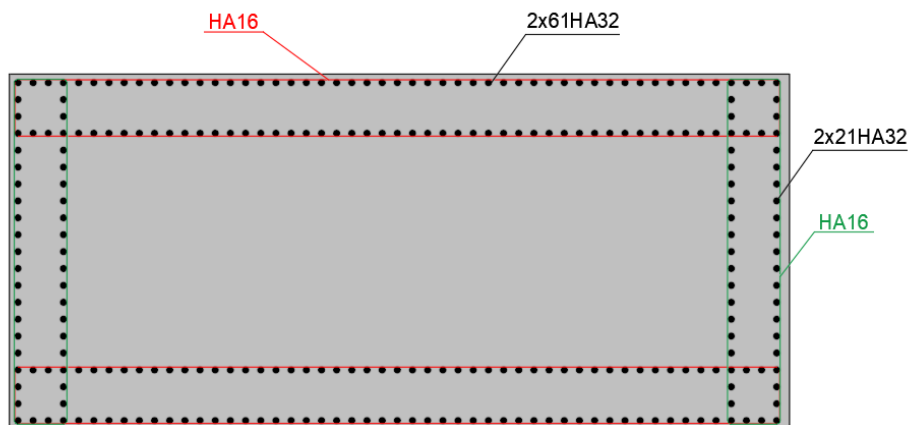


Figure V.4 : ferrailage de la pile pleine rectangulaire

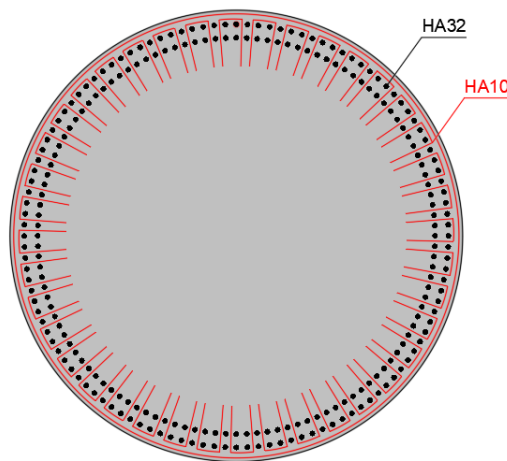


Figure V.5 : ferrailage de la pile pleine circulaire

V.2.2 Piles à section creuse :

Comme énoncé précédemment nous allons procéder à un changement de section dans le but de réduire le poids des piles.

V.2.2.1 Conception des piles :

Pile rectangulaire :

Dimensions : $b = 2,5m$, $h = 5m$, $e = 0,5m$

Aire : $A = 6,5m^2$

Périmètre = $26m$

$I_x = 5,41m^4$

$I_y = 18,1m^4$

Pile circulaire :

Dimensions : $d = 3,5m$, $e = 0,56m$

Aire = $11,33m^2$

Périmètre = $40,5m$

$I = 59,18m^4$

V.2.2.2 Vérification de la stabilité de la pile vis-à-vis du flambement :

L'élanement λ doit être inférieur à 70 pour que la vérification au flambement soit satisfaite :

$$\lambda = l_f / i \leq 70$$

-La pile la plus haute est la pile P-17 avec une hauteur de $h = 18,75m$

$$l_f = 0,7l_0 = 0,7 \times 18,75m = 13,125m$$

$$I_x = 5,41m^4 \text{ et } I_y = 18,1m^4$$

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{5,41}{6,5}} = 0,91m,$$

$$iy = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{18,1}{6,5}} = 1,67m$$

$$\lambda = \frac{l_f}{i} = \frac{13,125}{1,67} = 7,86 \leq 70 \rightarrow \text{la condition est vérifiée pas de risque de flambement}$$

Avec :



: Longueur de flambement



: Moment d'inertie de la section dans la direction de flambement



: Rayon de giration

A : l'aire de la section



: L'élancement mécanique

Pour un section circulaire D= 3,5m :

La pile la plus haute est la pile P-31 avec une hauteur de h = 15,35m

$$l_f = 0,7l_0 = 0,7 \times 15,35m = 10,745m$$

$$I = 24,79m^4$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{59,18}{11,33}} = 2,28m$$

$$\lambda = \frac{l_f}{i} = \frac{10,745}{2,28} = 4,71 \leq 70 \rightarrow \text{la condition est vérifiée pas de risque de flambement}$$

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

V.2.2.3 Calcul du ferrailage section rectangulaire :

La section est toujours orientée de manière à satisfaire la condition suivante (10) :

$$t_y/h \leq t_x/b$$

$$t_y/h = 0,1$$

$$t_x/b = 0,2$$

$\rightarrow 0,1 < 0,2$ donc la condition d'orientation vérifiée.

$$h' = 5cm, b' = 5cm$$

Avec

t_x, t_y : les épaisseurs de la section dans la direction transversale, et longitudinale respectivement.

h, b : les grandes dimensions de la section.

La base de la pile est soumise à une flexion composée avec un effort normal (N) et deux moments de flexion M_x et M_y .

Pour le calcul de la section des armatures on utilise les Abaques pour le dimensionnement des sections en béton armé.

Avec :

$$\eta = m_x/m_y$$

η : rapport des moments relatifs (sans dimension).

m_x, m_y, n : efforts intérieurs relatifs.

$$m_x = \frac{M_x}{b \times h^2 \times f_{c28}} ; m_y = \frac{M_y}{b \times h^2 \times f_{c28}} ; n = \frac{N}{b \times h \times f_{c28}}$$

L'on procèdera de la même manière que le calcul des sections pleines, c'est-à-dire nous allons utiliser le facteur réducteur pour éviter toute plastification.

Tableau V.5 récapitulatif des efforts les plus défavorables des section creuses

Piles	Effort normal N (kN)	Moment fléchissant Mx (kN.m)	Moment fléchissant My (kN.m)	Moment fléchissant réduit Mdx (kN.m)	Moment fléchissant réduit Mdy (kN.m)
Pile 1	15239.225	82873,67	106931,4	67376,97	86936,1
Pile 2	15618.06	100865,3	107257,3	80692,24	85805,84
Pile 3	16065.444	106785	106970,9	84750	84897,54
Pile 4	14791.297	98274,17	106712,5	76181,53	82722,87
Pile 5	12827.397	90576,51	107026,1	69674,24	82327,77
Pile 6	12010.831	86474,77	107250,5	66519,05	82500,38
Pile 7	16527.493	88402,03	107706	67482,47	82218,32
Pile 8	18989.803	106740,3	109205,1	80863,86	82731,14
Pile 9	18486.816	123944,7	109904,3	93897,5	83260,83
Pile 10	18611.526	132605,4	110335,8	100458,6	83587,73
Pile 11	18580.762	137764,7	110193,2	104367,2	83479,7
Pile 12	18588.063	141141,7	108887,7	106925,5	82490,68
Pile 13	18587.508	142421,7	108060,8	107895,2	81864,24
Pile 14	18582.648	139293,3	107804,6	103950,2	80451,19
Pile 15	18602.838	133603,1	108571,6	100453,5	81632,78
Pile 16	18522.5	127999,1	109831,6	95521,72	81963,88
Pile 17	18824.195	123242,7	110246,4	91972,16	82273,43
Pile 18	19748.264	113408,6	108538	85269,62	81607,52
Pile 19	17223.579	96955,09	103569,9	72898,56	77872,11
Pile 20	13040.927	90411,13	101053	67978,29	75979,7
Pile 21	14634.887	88064,1	99749,24	66213,61	74999,43
Pile 22	12888.707	90480,51	100292,2	67522,77	74844,93
Pile 23	17639.571	96874,33	102107,4	72294,28	76199,55
Pile 24	18402.284	102842	104902,4	77324,81	78873,98
Pile 25	15734.678	101098,3	105477,8	76013,76	79306,62
Pile 26	15917.487	99138,27	106541,2	75104,75	80713,03
Pile 27	17871.72	103809	107955,8	79853,08	83042,92
Pile 28	19586.5	120728,6	111340,7	95816,35	88365,63
Pile 29	19142.903	137294,1	111815,9	111621,2	90907,24
Pile 30	19455.938	145834,2	110019,9	118564,4	89447,07
Pile 31	16312.681	99764	82875,8	71260	59197
Pile 32	15377.53	92764,76	81223,8	66260,54	58017
Pile 33	15483.952	79903,88	78689,86	59188,06	58288,79
Pile 34	16204.572	63418,49	80179,61	48783,45	61676,62

V.2.2.4 Calcul de ferrailage :

Dans cette partie nous allons calculer le ferrailage des piles les plus sollicitées uniquement, à l'aide des abaques (10).

V.2.2.4.1 Application Numérique :

$$m_x = \frac{M_x}{b \times h^2 \times f_{c28}} = \frac{118,6}{2,5 \times 5^2 \times 30} = 0,063$$

$$m_y = \frac{M_y}{b \times h^2 \times f_{c28}} = \frac{89,45}{5 \times 2,5^2 \times 30} = 0,095$$

$$n = \frac{N}{b \times h \times f_{c28}} = \frac{19,46}{2,5 \times 5 \times 30} = 0,052$$

A partir de ces abaques on tire « w » (10)

-Direction longitudinale ($\eta = \infty$ et $\omega = 0.28$)

$$F_a = \frac{w \times b \times h \times f_{c28}}{\sigma_s} = \frac{0,28 \times 250 \times 500 \times 30}{500} = 2100 \text{ cm}^2$$

As cote b : $0.2 \times F_a = 420 \text{ cm}^2$

As cote h : $(0.5 - \beta) \cdot F_a = 0.3 F_a = 630 \text{ cm}^2$

-Direction transversale ($\eta = 0$ et $\omega = 0.2$)

$$F_a = \frac{w \times b \times h \times f_{c28}}{\sigma_s} = \frac{0,2 \times 250 \times 500 \times 30}{500} = 1500 \text{ cm}^2$$

As cote b : $0.2 \times F_a = 300 \text{ cm}^2$

As cote h : $(0.5 - \beta) \cdot F_a = 0.3 F_a = 450 \text{ cm}^2$

Donc la section de ferrailage qui doit être adoptée est la section max, or :

$F_a = 2100 \text{ cm}^2$

As cote Transversal : $420 \text{ cm}^2 \Rightarrow 2$ nappes de 52HA32

As cote longitudinal : $630 \text{ cm}^2 \Rightarrow 2$ nappes de 78HA32

Condition de non-fragilité :

$$A_{smin} \geq 0,23 \times \frac{h \times b \times f_{tj}}{f_e} = 138 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{La condition est vérifiée.}$$

V.2.2.4.2 Armature Transversale :

Espacement des armatures d'effort tranchant :

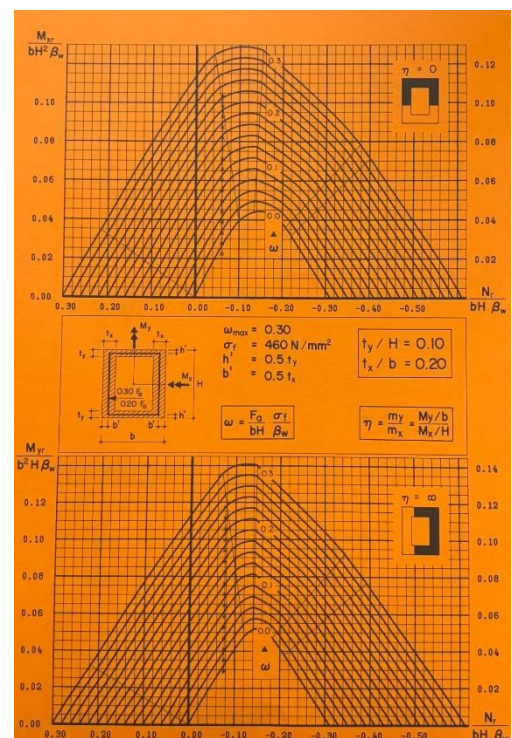


Figure V.6 Abaques de WALTHER section creuse rectangulaire (10)

L'espacement maximum des armatures d'effort tranchant devra satisfaire les conditions Suivantes :

$$S_{t, \max} \leq \text{Min} \{24 \Phi_t ; 8 \Phi_L ; 0,25d\} = 25,6\text{cm}$$

d : hauteur utile. $d=0,9h = 4,95\text{m}$.

$$\Phi_L = 32\text{mm}.$$

Φ_t : diamètre des armatures transversales, $\Phi_t = 16\text{mm}$ ($\Phi_t \geq \Phi_L/3$)

Section minimale des armatures d'effort tranchant :

La section A_t du brin ou des brins d'une armature transversale assurant le maintien d'une barre longitudinale ou d'un groupe de barres de section A_L , doit satisfaire la relation suivante :

$$A_t \geq (A_L \cdot f_{el}) \cdot S_t / (16 \times f_{et}) \cdot 100$$

Avec :

S_t : Espacement des armatures transversales.

A_L : Section totale des armatures longitudinales.

f_{el} , f_{et} : Caractéristiques de l'acier des armatures respectivement longitudinales et transversales.

On prend :

$$S_t = 7\text{cm}.$$

$$A_L = 2100\text{cm}^2.$$

$$f_{el} = f_{et} = 500\text{MPa}.$$

$$A_t = A_{t, \min} = 91,86 \text{ cm}^2 \Rightarrow 46\text{HA}16$$

V.2.2.5 Calcul du ferrailage section circulaire :

$$D = 3,5\text{m}$$

$$t = 0,16D = 0,56\text{m (épaisseur)}$$

$$h' = 0,3t = 16,8\text{cm}$$

$$m_r = \frac{M_r}{\frac{\pi \times r^2}{2} \times D \times f_{c28}} = 0,07$$

$$n = \frac{N}{\frac{\pi \times r^2}{2} \times f_{c28}} = 0,056$$

Depuis l'abaque de Walther, on tire à nouveau (10) « w »

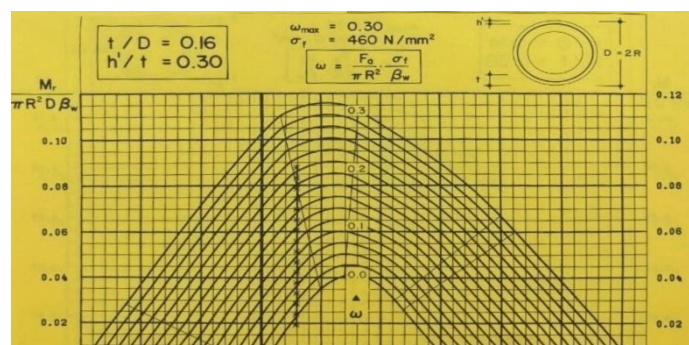


Figure V.7Abaques de WALTHER section creuse circulaire

$$w = 0,24$$

$$F_a = \frac{\frac{w \times \pi \times r^2}{2} \times f_{c28}}{\sigma_s} = 1385,44 \text{ cm}^2$$

Nombre de barres : 172HA32

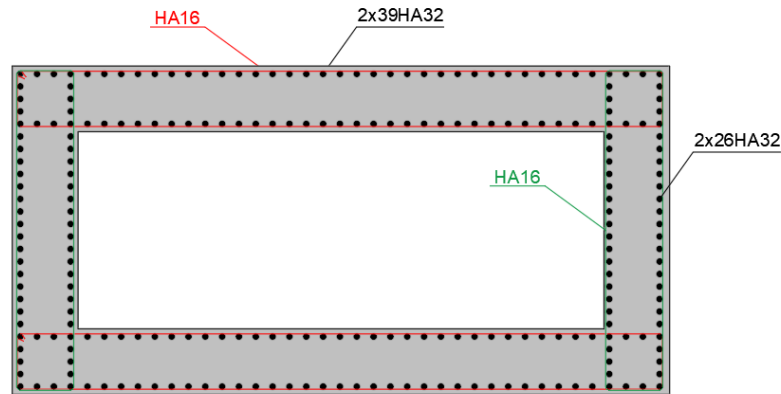


Figure V.8 : ferrailage de la pile creuse rectangulaire

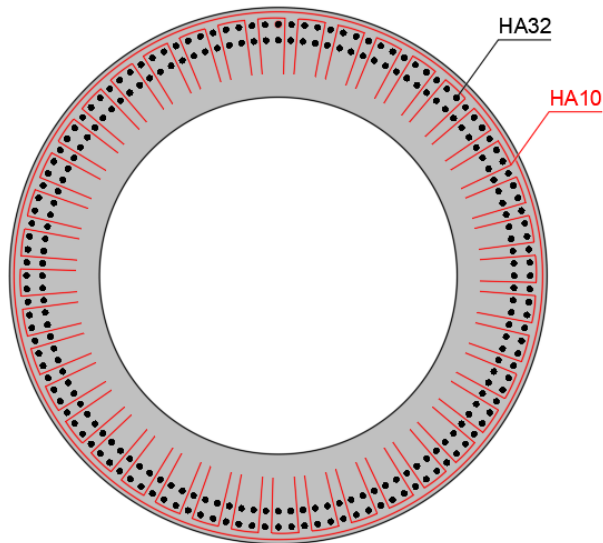


Figure V.9 : ferrailage de la pile creuse circulaire

V.3 Comparaison piles à section pleine et creuse :

Pour cette comparaison nous allons nous concentrer uniquement sur le coût du béton et des armature longitudinales et transversales, pour voir l'impact du changement de la section sur le coût.

- Coût béton C30/37/m³ : 12.000,00 DA
- Coût barres acier HA/quintaux : 15.000,00 DA
- Poids linéaire HA32 : 6,313kg/ml
- Poids linéaire HA16 : 1,578kg/ml

(Ces cout sont des estimations basées sur plusieurs prix réels)

- PP : Piles pleines
- PC : piles creuses

Tableau V.6. estimatif du cout des PP

P	Cout beton PP (M DA)	HA32 PP	Poids HA32 Kg/0.1T	Cout HA32 PP (M DA)	HA16 PP	Poids HA16 Kg/0.1T	Cout HA16 PP
1	2,07075	252	199,24	2,99	44	11,1	0,17
2	2,2605	262	226,13	3,39	46	11,6	0,17
3	2,343	262	234,39	3,52	46	11,6	0,17
4	2,64	250	252	3,78	44	11,1	0,17
5	2,7225	248	257,8	3,87	44	11,1	0,17
6	2,7555	250	263,03	3,95	44	11,1	0,17
7	2,8215	226	243,47	3,65	40	10,1	0,15
8	2,871	228	249,93	3,75	40	10,1	0,15
9	2,871	248	271,86	4,08	44	11,1	0,17
10	2,871	256	280,63	4,21	45	11,4	0,17
11	2,871	260	285,01	4,28	46	11,6	0,17
12	2,871	262	287,2	4,31	46	11,6	0,17
13	2,871	262	287,2	4,31	46	11,6	0,17
14	3,0525	250	291,38	4,37	44	11,1	0,17
15	3,036	246	285,16	4,28	43	10,9	0,16
16	3,069	240	281,23	4,22	42	10,6	0,16
17	3,09375	232	274,05	4,11	41	10,4	0,16
18	3,003	216	247,67	3,72	38	9,6	0,14
19	3,02775	202	233,52	3,5	36	9,1	0,14
20	3,036	214	248,07	3,72	38	9,6	0,14
21	3,02775	200	231,21	3,47	35	8,8	0,13
22	3,04425	206	239,44	3,59	36	9,1	0,14
23	3,04425	190	220,85	3,31	33	8,3	0,12
24	2,9964	204	233,39	3,5	36	9,1	0,14
25	2,95845	214	241,73	3,63	38	9,6	0,14
26	2,9238	218	243,37	3,65	38	9,6	0,14
27	2,71755	224	232,42	3,49	39	9,9	0,15
28	2,34795	256	229,5	3,44	45	11,4	0,17
29	2,11035	288	232,06	3,48	51	12,9	0,19
30	2,12025	290	234,77	3,52	51	12,9	0,19
31	2,53275	233	225,32	3,38	41	7,1	0,11
32	2,31825	211	186,77	2,8	37	6,4	0,1
33	2,02125	186	143,55	2,15	33	5,7	0,09
34	1,72425	200	131,67	1,98	35	6,1	0,09
T	92,05			123,38			5,14

Tableau V.7 estimatif du cout des PC

P	Cout beton PP (M DA)	HA32 PP	Poids HA32 Kg/0.1T	Cout HA32 PP (M DA)	HA16 PP	Poids HA16 Kg/0.1T	Cout HA16 PP
1	2,07075	252	199,24	2,99	44	11,1	0,17
2	2,2605	262	226,13	3,39	46	11,6	0,17
3	2,343	262	234,39	3,52	46	11,6	0,17
4	2,64	250	252	3,78	44	11,1	0,17
5	2,7225	248	257,8	3,87	44	11,1	0,17
6	2,7555	250	263,03	3,95	44	11,1	0,17
7	2,8215	226	243,47	3,65	40	10,1	0,15
8	2,871	228	249,93	3,75	40	10,1	0,15
9	2,871	248	271,86	4,08	44	11,1	0,17
10	2,871	256	280,63	4,21	45	11,4	0,17
11	2,871	260	285,01	4,28	46	11,6	0,17
12	2,871	262	287,2	4,31	46	11,6	0,17
13	2,871	262	287,2	4,31	46	11,6	0,17
14	3,0525	250	291,38	4,37	44	11,1	0,17
15	3,036	246	285,16	4,28	43	10,9	0,16
16	3,069	240	281,23	4,22	42	10,6	0,16
17	3,09375	232	274,05	4,11	41	10,4	0,16
18	3,003	216	247,67	3,72	38	9,6	0,14
19	3,02775	202	233,52	3,5	36	9,1	0,14
20	3,036	214	248,07	3,72	38	9,6	0,14
21	3,02775	200	231,21	3,47	35	8,8	0,13
22	3,04425	206	239,44	3,59	36	9,1	0,14
23	3,04425	190	220,85	3,31	33	8,3	0,12
24	2,9964	204	233,39	3,5	36	9,1	0,14
25	2,95845	214	241,73	3,63	38	9,6	0,14
26	2,9238	218	243,37	3,65	38	9,6	0,14
27	2,71755	224	232,42	3,49	39	9,9	0,15
28	2,34795	256	229,5	3,44	45	11,4	0,17
29	2,11035	288	232,06	3,48	51	12,9	0,19
30	2,12025	290	234,77	3,52	51	12,9	0,19
31	2,53275	233	225,32	3,38	41	7,1	0,11
32	2,31825	211	186,77	2,8	37	6,4	0,1
33	2,02125	186	143,55	2,15	33	5,7	0,09
34	1,72425	200	131,67	1,98	35	6,1	0,09
T	92,05			123,38			5,14

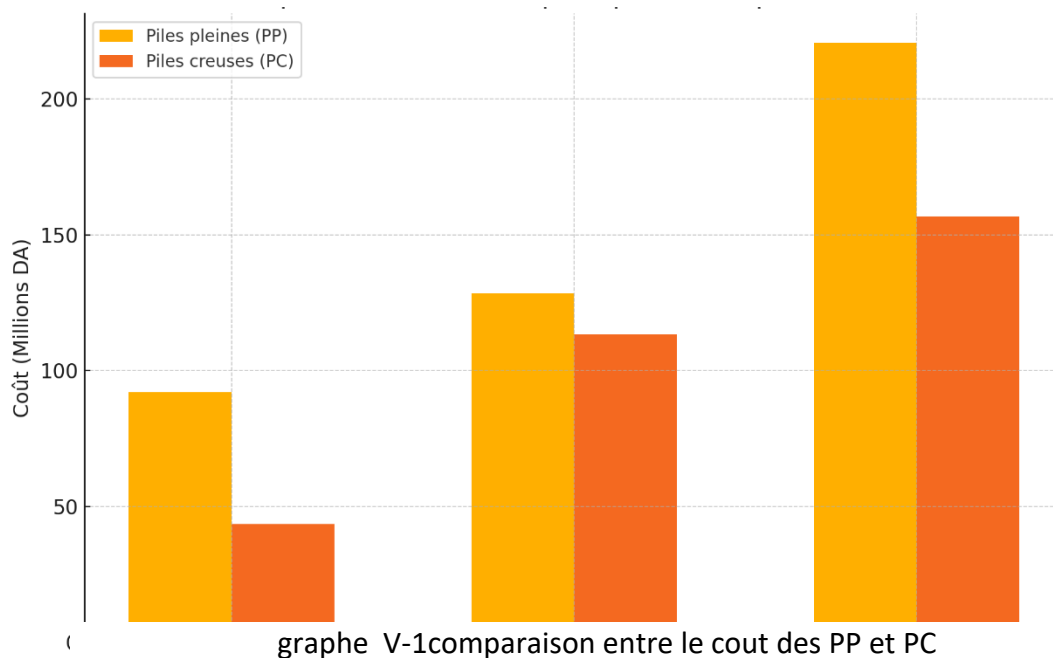
- Cout pour les piles pleines (Cpp) : $92,05 + 123,38 + 5,14 = 220,57$ millions de dinars.
- Cout pour piles creuses (Cpc) : $43,51 + 109 + 4,31 = 156,82$ millions de dinars

Calcul du pourcentage d'économie %E :

$$E\% = 100 \times (C_{pp} - C_{pc}) / C_{pp} = (220,57 - 156,82) \times 100 / 220,57 = \mathbf{28,9\%}$$

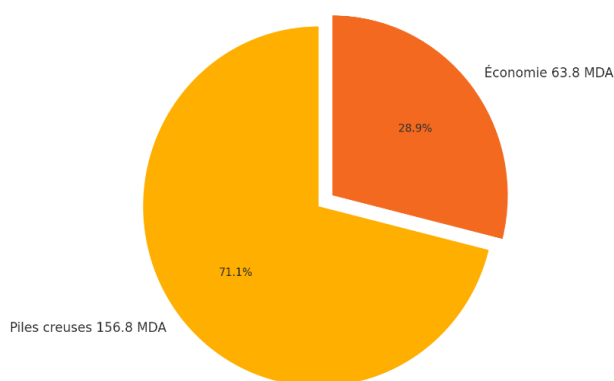
V.3.1 EVALUATION DES RESULTATS :

Ce graphique compare le coût du béton, de l'acier, et le coût total entre les piles pleines (PP)

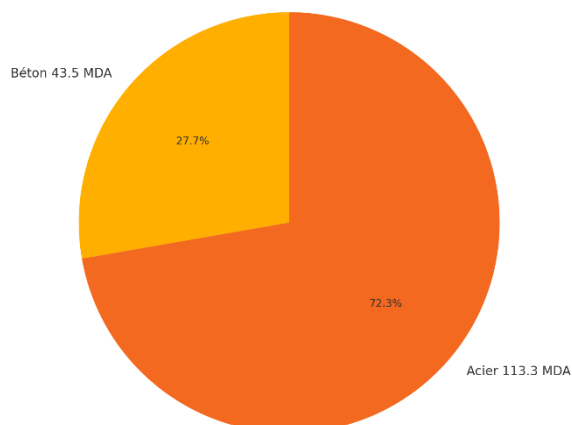


et les piles creuses (PC).

- Béton : Le coût du béton est fortement réduit pour les piles creuses grâce au volume moindre coulé, passant de ~92 MDA à ~44 MDA.
 - Acier : Le coût de l'acier est légèrement réduit dans les piles creuses (~113 MDA) par rapport aux piles pleines (~128 MDA).
 - Total : Le coût global des piles creuses est de ~157 MDA contre ~221 MDA pour les piles pleines
- Le passage aux piles creuses permet une réduction globale d'environ 29 % des coûts tout en assurant la même résistance de l'ouvrage



graphe V-3 Economie due au passage aux PC



graphe V-2 répartition du cout des PC

Graphique 2 :

Ce graphique en camembert montre comment se répartit le coût des piles creuses entre le béton et l'acier.

- Béton : 27,7 % du coût total (43,5 MDA)
- Acier : 72,3 % du coût total (113,3 MDA)

Pour les piles creuses, le coût est principalement porté par l'acier, tandis que le béton représente une part réduite grâce au gain de volume, ce qui illustre l'optimisation des ressources.

Graphique 3 :

Ce camembert met en évidence l'économie réalisée en choisissant les piles creuses.

- Piles creuses : 156,8 MDA (71,1 %)
- Économie réalisée : 63,8 MDA (28,9 %)

Le choix des piles creuses permet de réaliser une économie nette de 29 % tout en conservant les performances requises de l'ouvrage

Le passage des piles pleines aux piles creuses permet de réduire le coût des piles d'environ 29 % tout en maintenant les performances structurelles et sismiques de l'ouvrage. Cette solution optimise l'utilisation des matériaux, réduit le poids transmis aux fondations et s'inscrit dans une démarche de construction durable. Ainsi, l'adoption des piles creuses est recommandée pour garantir économie, qualité et efficacité dans notre projet.

V.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons procédé au dimensionnement des piles de notre ouvrage, un élément clé de l'infrastructure en raison de sa capacité à porter les charges et à les transmettre aux fondations. Ce travail nous a également permis de proposer une amélioration de la conception des piles, en optimisant leur géométrie. Cette optimisation permet une réduction significative de la quantité de béton et d'acier nécessaire, tout en maintenant une résistance équivalente, ce qui se traduit par une diminution notable du coût de construction.

CONCLUSION GENERALE

Le présent mémoire a permis de mener une étude complète et approfondie du viaduc ferroviaire reliant Aïn Naâdja à Baraki, une infrastructure majeure s'inscrivant dans le développement du réseau métropolitain d'Alger. À travers les différentes étapes de ce travail, nous avons mobilisé l'ensemble des connaissances théoriques et pratiques acquises au cours de notre formation, en les confrontant aux exigences concrètes des grands projets d'ouvrages d'art.

L'analyse a débuté par une présentation détaillée du projet, suivie d'un prédimensionnement rigoureux de ses éléments constitutifs, en tenant compte des contraintes du site ainsi que des exigences fonctionnelles et géotechniques. La phase suivante a porté sur l'estimation précise des charges et surcharges, ainsi que sur le calcul des sollicitations, aussi bien en phase de poussage qu'en phase de service. Ces analyses ont été réalisées à l'aide de logiciels spécialisés tels que MIDAS Civil et CSI Bridge, assurant ainsi la fiabilité et la sécurité de la structure face aux différents scénarios de chargement.

L'étude de la précontrainte, essentielle pour ce type de construction, a permis de déterminer les quantités et le positionnement optimal des câbles, en intégrant l'ensemble des pertes à court et à long terme. Le dimensionnement du ferrailage de la section transversale, ainsi que l'analyse détaillée des piles — incluant la vérification au flambement, l'analyse sismique et la proposition d'une alternative plus économique — ont également été réalisés, garantissant la robustesse et la pérennité de l'ouvrage.

Ce projet nous a permis de développer une approche globale de la conception, du calcul et de la justification d'un pont poussé, en intégrant les contraintes réelles liées au chantier, à l'économie et à la sécurité. Au-delà de l'aspect purement technique, ce travail a renforcé notre capacité à analyser, synthétiser et résoudre des problématiques complexes — des compétences essentielles pour l'exercice de notre futur métier d'ingénieur.

En conclusion, la réalisation de ce mémoire constitue une étape déterminante de notre parcours académique et professionnel, en nous offrant une meilleure compréhension des enjeux actuels de l'ingénierie des structures. Nous espérons que les résultats de ce travail pourront, même modestement, contribuer à l'évolution des pratiques dans le domaine des ouvrages d'art en Algérie.

Bibliographie

- (1). Association française de génie civil. *Guide des ponts poussés*. Paris : Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1999.
- (2). BERNARD-GELY, Anne et CALGARO, Jean-Armand. *Conception des ponts*. Paris : Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- (3). Union Internationale des Chemins de fer. *Charges pour le calcul des ponts-rails : Livret 702*. Paris : s.n., 2005. 702.
- (4). —. *Livret 776-1 – Représentation des charges sur les ouvrages d'art ferroviaires*. Paris : s.n., 2008. 776-1.
- (5). SNCF. *Livret 2.01 – règles de conception et de calcul des ouvrages en béton, en métal ou mixtes*. Paris : Direction de l'Ingénierie, 1995.
- (6). Ministère des travaux publics. *REGLES PARASISMIQUES APPLICABLES AU DOMAINE DES OUVRAGES D'ART RPOA 2008*. Alger : s.n., 2008.
- (7). NECHAK, Ali et KIRAM, Farid. *Etude d'un pont poussé au plateau des Annasers*. s.l. : ENP, Département Génie Civil, 2007.
- (8). Dr.M.Cherrak. Cours de béton précontraint de l'Ecole Nationale Polytechnique.
- (9). *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites BAEL 91 révisées 99*. 2000. Fascicule 62, titre 1er du CCTG - Travaux section 1 : béton armé.
- (10). WALTHER.R, HOURIET.B. *Abaques pour le dimensionnement des sections en béton armé*. s.l. : Presse polytechniques romandes de Lausanne, 1977.
- (11). CALGARO, Jean-Armand et VIRLOGEUX, Michel. *Projet et construction des ponts*.
- (12). AFNOR. *Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 2-5 : Actions sur les structures - Actions thermiques*. Paris : Association Française de Normalisation, 1997. ENV 1991-2-5.

Logiciels techniques :

CSI Bridge v26, Midas Civil 2022 pour la modélisation et calculs des efforts

AUTOCAD pour les dessins

EXCEL pour les calculs, réparation des tableaux et des feuilles de calcul.

ROBOT EXPERT — Estimation de la section d'acier.

ANNEXE

Annexe A

Calcul des pertes pour la précontrainte de continuité

Les pertes Par Frottement

Section	X(m)	α_i (rd)	$\sum \alpha_i$	f(rd ⁻¹)	$\Delta\sigma_{fro}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{fro}$ (%)
Culée	0	0,335	0,335	0,2	96,36	3,60
Déviateur1	8,83333333	0,335	0,669	0,2	186,48	6,96
Déviateur2	19,875	0,329	0,999	0,2	269,46	10,06
Appui 1	26,5	0,329	1,328	0,2	347,16	12,96
Appui 1	26,5	0,247	0,247	0,2	71,59	2,67
Déviateur1	35,5	0,247	0,493	0,2	139,74	5,22
Déviateur2	53,5	0,247	0,740	0,2	204,61	7,64
Appui 2	62,5	0,247	0,986	0,2	266,36	9,94
Appui 2	62,5	0,247	0,247	0,2	71,59	2,67
Déviateur1	71,5	0,247	0,493	0,2	139,74	5,22
Déviateur2	89,5	0,247	0,740	0,2	204,61	7,64
Appui 3	98,5	0,247	0,986	0,2	266,36	9,94
Appui 3	98,5	0,236	0,236	0,2	68,47	2,56
Déviateur1	107,9375	0,236	0,471	0,2	133,79	5,00
Déviateur2	126,8125	0,236	0,707	0,2	196,11	7,32
Appui 4	136,25	0,236	0,942	0,2	255,56	9,54
Appui 4	136,25	0,338	0,338	0,2	97,35	3,63
Déviateur1	142,6875	0,338	0,677	0,2	188,34	7,03
Déviateur2	155,5625	0,338	1,015	0,2	273,37	10,21
Appui 5	162	0,338	1,353	0,2	352,83	13,17
Appui 5	162	0,338	0,338	0,2	97,35	3,63
Déviateur1	168,4375	0,338	0,677	0,2	188,34	7,03
Déviateur2	181,3125	0,338	1,015	0,2	273,37	10,21
Appui 6	187,75	0,338	1,353	0,2	352,83	13,17
Appui 6	187,75	0,338	0,338	0,2	97,35	3,63
Déviateur1	194,1875	0,338	0,677	0,2	188,34	7,03
Déviateur2	207,0625	0,338	1,015	0,2	273,37	10,21
Appui 7	213,5	0,338	1,353	0,2	352,83	13,17
Appui 7	213,5	0,186	0,186	0,2	54,23	2,02
Déviateur1	225,5625	0,186	0,371	0,2	106,47	3,98
Déviateur2	249,6875	0,186	0,557	0,2	156,82	5,85
Appui 8	261,75	0,186	0,742	0,2	205,33	7,67
Appui 8	261,75	0,186	0,186	0,2	54,23	2,02
Déviateur1	273,8125	0,186	0,371	0,2	106,47	3,98
Déviateur2	297,9375	0,186	0,557	0,2	156,82	5,85
Appui 9	310	0,186	0,742	0,2	205,33	7,67

Appui 9	310	0,186	0,186	0,2	54,23	2,02
Déviateur1	322,0625	0,186	0,371	0,2	106,47	3,98
Déviateur2	346,1875	0,186	0,557	0,2	156,82	5,85
Appui 10	358,25	0,186	0,742	0,2	205,33	7,67
Appui 10	358,25	0,186	0,186	0,2	54,23	2,02
Déviateur1	370,3125	0,186	0,371	0,2	106,47	3,98
Déviateur2	394,4375	0,186	0,557	0,2	156,82	5,85
Appui 11	406,5	0,186	0,742	0,2	205,33	7,67
Appui 11	406,5	0,186	0,186	0,2	54,23	2,02
Déviateur1	418,5625	0,186	0,371	0,2	106,47	3,98
Déviateur2	442,6875	0,186	0,557	0,2	156,82	5,85
Appui 12	454,75	0,186	0,742	0,2	205,33	7,67
Appui 12	454,75	0,186	0,186	0,2	54,23	2,02
Déviateur1	466,8125	0,186	0,371	0,2	106,47	3,98
Déviateur2	490,9375	0,186	0,557	0,2	156,82	5,85
Appui 13	503	0,186	0,742	0,2	205,33	7,67
Appui 13	503	0,186	0,186	0,2	54,23	2,02
Déviateur1	515,0625	0,186	0,371	0,2	106,47	3,98
Déviateur2	539,1875	0,186	0,557	0,2	156,82	5,85
Appui 14	551,25	0,186	0,742	0,2	205,33	7,67
Appui 14	551,25	0,186	0,186	0,2	54,23	2,02
Déviateur1	563,3125	0,186	0,371	0,2	106,47	3,98
Déviateur2	587,4375	0,186	0,557	0,2	156,82	5,85
Appui 15	599,5	0,186	0,742	0,2	205,33	7,67
Appui 15	599,5	0,186	0,186	0,2	54,23	2,02
Déviateur1	611,5625	0,186	0,371	0,2	106,47	3,98
Déviateur2	635,6875	0,186	0,557	0,2	156,82	5,85
Appui 16	647,75	0,186	0,742	0,2	205,33	7,67
Appui 16	647,75	0,186	0,186	0,2	54,23	2,02
Déviateur1	659,8125	0,186	0,371	0,2	106,47	3,98
Déviateur2	683,9375	0,186	0,557	0,2	156,82	5,85
Appui 17	696	0,186	0,742	0,2	205,33	7,67
Appui 17	696	0,176	0,176	0,2	51,41	1,92
Déviateur1	708,75	0,176	0,352	0,2	101,05	3,77
Déviateur2	734,25	0,176	0,527	0,2	148,97	5,56
Appui 18	747	0,176	0,703	0,2	195,24	7,29
Appui 18	747	0,176	0,176	0,2	51,41	1,92
Déviateur1	759,75	0,176	0,352	0,2	101,05	3,77
Déviateur2	785,25	0,176	0,527	0,2	148,97	5,56
Appui 19	798	0,176	0,703	0,2	195,24	7,29
Appui 19	798	0,293	0,293	0,2	84,77	3,17
Déviateur1	805,5	0,293	0,587	0,2	164,72	6,15
Déviateur2	820,5	0,293	0,880	0,2	240,10	8,96

Appui 20	828	0,293	1,173	0,2	311,20	11,62
Appui 20	828	0,293	0,293	0,2	84,77	3,17
Déviateur1	835,5	0,293	0,587	0,2	164,72	6,15
Déviateur2	850,5	0,293	0,880	0,2	240,10	8,96
Appui 21	858	0,293	1,173	0,2	311,20	11,62
Appui 21	858	0,293	0,293	0,2	84,77	3,17
Déviateur1	865,5	0,293	0,587	0,2	164,72	6,15
Déviateur2	880,5	0,293	0,880	0,2	240,10	8,96
Appui 22	888	0,293	1,173	0,2	311,20	11,62
Appui 22	888	0,293	0,293	0,2	84,77	3,17
Déviateur1	895,5	0,293	0,587	0,2	164,72	6,15
Déviateur2	910,5	0,293	0,880	0,2	240,10	8,96
Appui 23	918	0,293	1,173	0,2	311,20	11,62
Appui 23	918	0,176	0,176	0,2	51,41	0,85
Déviateur1	930,75	0,176	0,352	0,2	101,05	1,68
Déviateur2	956,25	0,176	0,527	0,2	148,97	2,47
Appui 24	969	0,176	0,703	0,2	195,24	3,24
Appui 24	969	0,231	0,231	0,2	67,22	1,12
Déviateur1	978,625	0,231	0,462	0,2	131,40	2,18
Déviateur2	997,875	0,231	0,693	0,2	192,68	3,20
Appui 25	1007,5	0,231	0,924	0,2	251,19	4,17
Appui 25	1007,5	0,231	0,231	0,2	67,22	1,12
Déviateur1	1017,125	0,231	0,462	0,2	131,40	2,18
Déviateur2	1036,375	0,231	0,693	0,2	192,68	3,20
Appui 26	1046	0,231	0,924	0,2	251,19	4,17
Appui 26	1046	0,231	0,231	0,2	67,22	1,12
Déviateur1	1055,625	0,231	0,462	0,2	131,40	2,18
Déviateur2	1074,875	0,231	0,693	0,2	192,68	3,20
Appui 27	1084,5	0,231	0,924	0,2	251,19	4,17
Appui 27	1084,5	0,176	0,176	0,2	51,41	1,92
Déviateur1	1097,25	0,176	0,352	0,2	101,05	3,77
Déviateur2	1122,75	0,176	0,527	0,2	148,97	5,56
Appui 28	1135,5	0,176	0,703	0,2	195,24	7,29
Appui 28	1135,5	0,176	0,176	0,2	51,41	1,92
Déviateur1	1148,25	0,176	0,352	0,2	101,05	3,77
Déviateur2	1173,75	0,176	0,527	0,2	148,97	5,56
Appui 29	1186,5	0,176	0,703	0,2	195,24	7,29
Appui 29	1186,5	0,176	0,176	0,2	51,41	1,92
Déviateur1	1199,25	0,176	0,352	0,2	101,05	3,77
Déviateur2	1224,75	0,176	0,527	0,2	148,97	5,56
Appui 30	1237,5	0,176	0,703	0,2	195,24	7,29
Appui 30	1237,5	0,176	0,176	0,2	51,41	1,92
Déviateur1	1250,25	0,176	0,352	0,2	101,05	3,77

Déviateur2	1275,75	0,176	0,527	0,2	148,97	5,56
Appui 31	1288,5	0,176	0,703	0,2	195,24	7,29
Appui 31	1288,5	0,199	0,199	0,2	57,97	2,16
Déviateur1	1299,75	0,199	0,397	0,2	113,68	4,24
Déviateur2	1322,25	0,199	0,596	0,2	167,21	6,24
Appui 32	1333,5	0,199	0,795	0,2	218,67	8,16
Appui 32	1333,5	0,199	0,199	0,2	57,97	2,16
Déviateur1	1344,75	0,199	0,397	0,2	113,68	4,24
Déviateur2	1367,25	0,199	0,596	0,2	167,21	6,24
Appui 33	1378,5	0,199	0,795	0,2	218,67	8,16
Appui 33	1378,5	0,199	0,199	0,2	57,97	2,16
Déviateur1	1389,75	0,199	0,397	0,2	113,68	4,24
Déviateur2	1412,25	0,199	0,596	0,2	167,21	6,24
Appui 34	1423,5	0,199	0,795	0,2	218,67	8,16
Appui 34	1423,5	0,220	0,220	0,2	64,08	2,39
Déviateur1	1433,625	0,220	0,440	0,2	125,39	4,68
Déviateur2	1453,875	0,220	0,660	0,2	184,07	6,87
Culée2	1464	0,220	0,880	0,2	240,22	8,97

Les pertes par recul d'ancrage

Section	X(m)	α_i (rd)	α_{tot} (rd)	ψ	λ	$\Delta\sigma_{rec}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{rec}$ (%)
Culée	0	0,335	1,328	0,010	8,856	264,22	9,86
Déviateur1	8,83333333	0,335				66,57	2,49
Déviateur2	19,875	0,329				0,00	0,00
Appui 1	26,5	0,329				0,00	0,00
Appui 1	26,5	0,247	0,986	0,005	11,980	195,33	7,29
Déviateur1	35,5	0,247				48,58	1,81
Déviateur2	53,5	0,247				0,00	0,00
Appui 2	62,5	0,247				0,00	0,00
Appui 2	62,5	0,247	0,986	0,005	11,980	195,33	7,29
Déviateur1	71,5	0,247				48,58	1,81
Déviateur2	89,5	0,247				0,00	0,00
Appui 3	98,5	0,247				0,00	0,00
Appui 3	98,5	0,236	0,942	0,005	12,551	186,44	6,96
Déviateur1	107,9375	0,236				46,25	1,73
Déviateur2	126,8125	0,236				0,00	0,00
Appui 4	136,25	0,236				0,00	0,00
Appui 4	136,25	0,338	1,353	0,011	8,649	270,55	10,10
Déviateur1	142,6875	0,338				69,18	2,58
Déviateur2	155,5625	0,338				0,00	0,00
Appui 5	162	0,338				0,00	0,00
Appui 5	162	0,338	1,353	0,011	8,649	270,55	10,10
Déviateur1	168,4375	0,338				69,18	2,58
Déviateur2	181,3125	0,338				0,00	0,00
Appui 6	187,75	0,338				0,00	0,00
Appui 6	187,75	0,338	1,353	0,011	8,649	270,55	10,10
Déviateur1	194,1875	0,338				69,18	2,58
Déviateur2	207,0625	0,338				0,00	0,00
Appui 7	213,5	0,338				0,00	0,00
Appui 7	213,5	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	225,5625	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	249,6875	0,186				0,00	0,00
Appui 8	261,75	0,186				0,00	0,00
Appui 8	261,75	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	273,8125	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	297,9375	0,186				0,00	0,00
Appui 9	310	0,186				0,00	0,00
Appui 9	310	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	322,0625	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	346,1875	0,186				0,00	0,00

Appui 10	358,25	0,186				0,00	0,00
Appui 10	358,25	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	370,3125	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	394,4375	0,186				0,00	0,00
Appui 11	406,5	0,186				0,00	0,00
Appui 11	406,5	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	418,5625	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	442,6875	0,186				0,00	0,00
Appui 12	454,75	0,186				0,00	0,00
Appui 12	454,75	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	466,8125	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	490,9375	0,186				0,00	0,00
Appui 13	503	0,186				0,00	0,00
Appui 13	503	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	515,0625	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	539,1875	0,186				0,00	0,00
Appui 14	551,25	0,186				0,00	0,00
Appui 14	551,25	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	563,3125	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	587,4375	0,186				0,00	0,00
Appui 15	599,5	0,186				0,00	0,00
Appui 15	599,5	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	611,5625	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	635,6875	0,186				0,00	0,00
Appui 16	647,75	0,186				0,00	0,00
Appui 16	647,75	0,186	0,742	0,003	15,984	146,39	5,47
Déviateur1	659,8125	0,186				35,92	1,34
Déviateur2	683,9375	0,186				0,00	0,00
Appui 17	696	0,186				0,00	0,00
Appui 17	696	0,176	0,703	0,003	16,885	138,58	5,17
Déviateur1	708,75	0,176				33,94	1,27
Déviateur2	734,25	0,176				0,00	0,00
Appui 18	747	0,176				0,00	0,00
Appui 18	747	0,176	0,703	0,003	16,885	138,58	5,17
Déviateur1	759,75	0,176				33,94	1,27
Déviateur2	785,25	0,176				0,00	0,00
Appui 19	798	0,176				0,00	0,00
Appui 19	798	0,293	1,173	0,008	10,027	233,38	8,71
Déviateur1	805,5	0,293				58,81	2,20
Déviateur2	820,5	0,293				0,00	0,00
Appui 20	828	0,293				0,00	0,00
Appui 20	828	0,293	1,173	0,008	10,027	233,38	8,71
Déviateur1	835,5	0,293				58,81	2,20
Déviateur2	850,5	0,293				0,00	0,00
Appui 21	858	0,293				0,00	0,00

Appui 21	858	0,293	1,173	0,008	10,027	233,38	8,71
Déviateur1	865,5	0,293				58,81	2,20
Déviateur2	880,5	0,293				0,00	0,00
Appui 22	888	0,293				0,00	0,00
Appui 22	888	0,293	1,173	0,008	10,027	233,38	8,71
Déviateur1	895,5	0,293				58,81	2,20
Déviateur2	910,5	0,293				0,00	0,00
Appui 23	918	0,293				0,00	0,00
Appui 23	918	0,176	0,703	0,003	16,885	138,58	2,30
Déviateur1	930,75	0,176				33,94	0,56
Déviateur2	956,25	0,176				0,00	0,00
Appui 24	969	0,176				0,00	0,00
Appui 24	969	0,231	0,924	0,005	12,796	182,88	3,03
Déviateur1	978,625	0,231				45,31	0,75
Déviateur2	997,875	0,231				0,00	0,00
Appui 25	1007,5	0,231				0,00	0,00
Appui 25	1007,5	0,231	0,924	0,005	12,796	182,88	3,03
Déviateur1	1017,125	0,231				45,31	0,75
Déviateur2	1036,375	0,231				0,00	0,00
Appui 26	1046	0,231				0,00	0,00
Appui 26	1046	0,231	0,924	0,005	12,796	182,88	3,03
Déviateur1	1055,625	0,231				45,31	0,75
Déviateur2	1074,875	0,231				0,00	0,00
Appui 27	1084,5	0,231				0,00	0,00
Appui 27	1084,5	0,176	0,703	0,003	16,885	138,58	5,17
Déviateur1	1097,25	0,176				33,94	1,27
Déviateur2	1122,75	0,176				0,00	0,00
Appui 28	1135,5	0,176				0,00	0,00
Appui 28	1135,5	0,176	0,703	0,003	16,885	138,58	5,17
Déviateur1	1148,25	0,176				33,94	1,27
Déviateur2	1173,75	0,176				0,00	0,00
Appui 29	1186,5	0,176				0,00	0,00
Appui 29	1186,5	0,176	0,703	0,003	16,885	138,58	5,17
Déviateur1	1199,25	0,176				33,94	1,27
Déviateur2	1224,75	0,176				0,00	0,00
Appui 30	1237,5	0,176				0,00	0,00
Appui 30	1237,5	0,176	0,703	0,003	16,885	138,58	5,17
Déviateur1	1250,25	0,176				33,94	1,27
Déviateur2	1275,75	0,176				0,00	0,00
Appui 31	1288,5	0,176				0,00	0,00
Appui 31	1288,5	0,199	0,795	0,004	14,920	156,83	5,86
Déviateur1	1299,75	0,199				38,58	1,44
Déviateur2	1322,25	0,199				0,00	0,00
Appui 32	1333,5	0,199				0,00	0,00
Appui 32	1333,5	0,199	0,795	0,004	14,920	156,83	5,86

Déviateur1	1344,75	0,199				38,58	1,44
Déviateur2	1367,25	0,199				0,00	0,00
Appui 33	1378,5	0,199				0,00	0,00
Appui 33	1378,5	0,199	0,795	0,004	14,920	156,83	5,86
Déviateur1	1389,75	0,199				38,58	1,44
Déviateur2	1412,25	0,199				0,00	0,00
Appui 34	1423,5	0,199				0,00	0,00
Appui 34	1423,5	0,220	0,880	0,004	13,449	173,99	6,50
Déviateur1	1433,625	0,220				43,00	1,61
Déviateur2	1453,875	0,220				0,00	0,00
Culée2	1464	0,220				0,00	0,00

Perte par déformations instantanées du béton :

Section	$\Delta\sigma_{fro}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{rec}$ (Mpa)	M perm (kN.m)	P (kN)	Σb (Mpa)	$\Delta\sigma_{acc}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{acc}$ (%)
Culée	96,36	264,22	0,00	18542,54	3,85	8,74	0,33
Déviateur1	186,48	66,57	7959,76	19402,86	5,65	12,80	0,48
Déviateur2	269,46	0,00	-5316,60	19271,48	7,39	16,75	0,63
Appui 1	347,16	0,00	-15017,22	18649,91	4,83	10,95	0,41
Appui 1	71,59	195,33	-15017,22	19291,82	4,96	11,25	0,42
Déviateur1	139,74	48,58	11020,22	19920,59	5,41	12,28	0,46
Déviateur2	204,61	0,00	1670,53	19790,32	6,63	15,03	0,56
Appui 2	266,36	0,00	-20579,76	19296,33	5,35	12,14	0,45
Appui 2	71,59	195,33	-20579,76	19291,82	5,35	12,14	0,45
Déviateur1	139,74	48,58	6735,68	19920,59	5,99	13,58	0,51
Déviateur2	204,61	0,00	-2068,38	19790,32	7,13	16,17	0,60
Appui 3	266,36	0,00	-23813,93	19296,33	5,58	12,66	0,47
Appui 3	68,47	186,44	-23813,93	19387,87	5,60	12,70	0,47
Déviateur1	133,79	46,25	8294,79	19986,87	5,80	13,16	0,49
Déviateur2	196,11	0,00	6092,06	19858,32	6,06	13,73	0,51
Appui 4	255,56	0,00	-18063,29	19382,73	5,19	11,78	0,44
Appui 4	97,35	270,55	-18063,29	18484,00	5,01	11,36	0,42
Déviateur1	188,34	69,18	-244,21	19367,07	6,74	15,28	0,57
Déviateur2	273,37	0,00	-1330,16	19240,27	6,84	15,51	0,58
Appui 5	352,83	0,00	-9551,97	18604,53	4,43	10,05	0,38
Appui 5	97,35	270,55	-9551,97	18484,00	4,41	10,00	0,37
Déviateur1	188,34	69,18	6665,91	19367,07	5,81	13,17	0,49
Déviateur2	273,37	0,00	3065,83	19240,27	6,25	14,17	0,53
Appui 6	352,83	0,00	-6840,29	18604,53	4,24	9,62	0,36
Appui 6	97,35	270,55	-6840,29	18484,00	4,22	9,56	0,36
Déviateur1	188,34	69,18	1154,70	19367,07	6,55	14,85	0,55
Déviateur2	273,37	0,00	-14413,26	19240,27	8,60	19,50	0,73
Appui 7	352,83	0,00	-31778,04	18604,53	6,00	13,62	0,51
Appui 7	54,23	146,39	-31778,04	19822,25	6,25	14,17	0,53
Déviateur1	106,47	35,92	12785,12	20288,06	5,30	12,03	0,45
Déviateur2	156,82	0,00	6818,84	20172,65	6,07	13,76	0,51
Appui 8	205,33	0,00	-46204,77	19784,57	7,26	16,47	0,61
Appui 8	54,23	146,39	-46204,77	19822,25	7,27	16,49	0,62
Déviateur1	106,47	35,92	4534,87	20288,06	6,41	14,54	0,54
Déviateur2	156,82	0,00	5952,04	20172,65	6,18	14,02	0,52
Appui 9	205,33	0,00	-43031,94	19784,57	7,04	15,96	0,60
Appui 9	54,23	146,39	-43031,94	19822,25	7,05	15,98	0,60
Déviateur1	106,47	35,92	6117,57	20288,06	6,20	14,06	0,52
Déviateur2	156,82	0,00	4120,05	20172,65	6,43	14,58	0,54

Appui 10	205,33	0,00	-44282,28	19784,57	7,13	16,16	0,60
Appui 10	54,23	146,39	-44282,28	19822,25	7,13	16,18	0,60
Déviateur1	106,47	35,92	5082,90	20288,06	6,34	14,38	0,54
Déviateur2	156,82	0,00	4692,33	20172,65	6,35	14,41	0,54
Appui 11	205,33	0,00	-44348,80	19784,57	7,13	16,17	0,60
Appui 11	54,23	146,39	-44348,80	19822,25	7,14	16,19	0,60
Déviateur1	106,47	35,92	4798,88	20288,06	6,38	14,46	0,54
Déviateur2	156,82	0,00	5595,02	20172,65	6,23	14,13	0,53
Appui 12	205,33	0,00	-44531,41	19784,57	7,14	16,20	0,60
Appui 12	54,23	146,39	-44531,41	19822,25	7,15	16,22	0,61
Déviateur1	106,47	35,92	4447,74	20288,06	6,43	14,57	0,54
Déviateur2	156,82	0,00	4489,21	20172,65	6,38	14,47	0,54
Appui 13	205,33	0,00	-47541,66	19784,57	7,36	16,68	0,62
Appui 13	54,23	146,39	-47541,66	19822,25	7,36	16,70	0,62
Déviateur1	106,47	35,92	6967,21	20288,06	6,09	13,80	0,52
Déviateur2	156,82	0,00	2485,23	20172,65	6,65	15,08	0,56
Appui 14	205,33	0,00	-44895,27	19784,57	7,17	16,26	0,61
Appui 14	54,23	146,39	-44895,27	19822,25	7,18	16,28	0,61
Déviateur1	106,47	35,92	5947,96	20288,06	6,22	14,11	0,53
Déviateur2	156,82	0,00	2971,02	20172,65	6,58	14,93	0,56
Appui 15	205,33	0,00	-45209,07	19784,57	7,19	16,31	0,61
Appui 15	54,23	146,39	-45209,07	19822,25	7,20	16,33	0,61
Déviateur1	106,47	35,92	5365,45	20288,06	6,30	14,29	0,53
Déviateur2	156,82	0,00	3993,02	20172,65	6,45	14,62	0,55
Appui 16	205,33	0,00	-44797,69	19784,57	7,16	16,24	0,61
Appui 16	54,23	146,39	-44797,69	19822,25	7,17	16,26	0,61
Déviateur1	106,47	35,92	4805,46	20288,06	6,38	14,46	0,54
Déviateur2	156,82	0,00	3244,63	20172,65	6,55	14,85	0,55
Appui 17	205,33	0,00	-47306,92	19784,57	7,34	16,65	0,62
Appui 17	51,41	138,58	-47306,92	19907,23	7,37	16,70	0,62
Déviateur1	101,05	33,94	7136,51	20347,30	6,08	13,80	0,52
Déviateur2	148,97	0,00	3126,76	20235,44	6,58	14,93	0,56
Appui 18	195,24	0,00	-54648,26	19865,31	7,88	17,86	0,67
Appui 18	51,41	138,58	-54648,26	19907,23	7,88	17,88	0,67
Déviateur1	101,05	33,94	3545,26	20347,30	6,57	14,89	0,56
Déviateur2	148,97	0,00	12796,10	20235,44	5,28	11,98	0,45
Appui 19	195,24	0,00	-40134,46	19865,31	6,85	15,53	0,58
Appui 19	84,77	233,38	-40134,46	18882,00	6,65	15,08	0,56
Déviateur1	164,72	58,81	-12390,55	19638,99	8,47	19,20	0,72
Déviateur2	240,10	0,00	246,20	19506,36	6,72	15,24	0,57
Appui 20	311,20	0,00	-14521,09	18937,61	4,85	11,00	0,41
Appui 20	84,77	233,38	-14521,09	18882,00	4,84	10,98	0,41
Déviateur1	164,72	58,81	5096,39	19638,99	6,11	13,86	0,52
Déviateur2	240,10	0,00	1749,02	19506,36	6,52	14,78	0,55
Appui 21	311,20	0,00	-20392,87	18937,61	5,27	11,94	0,45

Appui 21	84,77	233,38	-20392,87	18882,00	5,26	11,92	0,45
Déviateur1	164,72	58,81	1725,37	19638,99	6,57	14,89	0,56
Déviateur2	240,10	0,00	2788,87	19506,36	6,38	14,46	0,54
Appui 22	311,20	0,00	-17647,43	18937,61	5,07	11,50	0,43
Appui 22	84,77	233,38	-17647,43	18882,00	5,06	11,48	0,43
Déviateur1	164,72	58,81	1218,97	19638,99	6,63	15,05	0,56
Déviateur2	240,10	0,00	-414,43	19506,36	6,81	15,44	0,58
Appui 23	311,20	0,00	-28718,02	18937,61	5,86	13,28	0,50
Appui 23	51,41	138,58	-28718,02	46691,23	11,46	25,99	0,97
Déviateur1	101,05	33,94	30428,55	47131,30	12,22	27,72	1,03
Déviateur2	148,97	0,00	20187,37	47019,44	13,56	30,75	1,15
Appui 24	195,24	0,00	-49518,95	46649,31	12,92	29,31	1,09
Appui 24	67,22	182,88	-49518,95	46210,46	12,84	29,11	1,09
Déviateur1	131,40	45,31	-5488,08	46797,53	16,94	38,41	1,43
Déviateur2	192,68	0,00	4331,22	46669,80	15,57	35,32	1,32
Appui 25	251,19	0,00	-30336,41	46201,70	11,48	26,03	0,97
Appui 25	67,22	182,88	-30336,41	46210,46	11,48	26,03	0,97
Déviateur1	131,40	45,31	7471,44	46797,53	15,20	34,46	1,29
Déviateur2	192,68	0,00	10043,87	46669,80	14,81	33,57	1,25
Appui 26	251,19	0,00	-33442,81	46201,70	11,70	26,53	0,99
Appui 26	67,22	182,88	-33442,81	46210,46	11,70	26,53	0,99
Déviateur1	131,40	45,31	5435,12	46797,53	15,47	35,08	1,31
Déviateur2	192,68	0,00	6020,09	46669,80	15,35	34,80	1,30
Appui 27	251,19	0,00	-37927,41	46201,70	12,01	27,25	1,02
Appui 27	51,41	138,58	-37927,41	19907,23	6,70	15,20	0,57
Déviateur1	101,05	33,94	18403,03	20347,30	4,57	10,36	0,39
Déviateur2	148,97	0,00	8025,07	20235,44	5,93	13,44	0,50
Appui 28	195,24	0,00	-60123,25	19865,31	8,26	18,74	0,70
Appui 28	51,41	138,58	-60123,25	19907,23	8,27	18,76	0,70
Déviateur1	101,05	33,94	309,86	20347,30	7,00	15,88	0,59
Déviateur2	148,97	0,00	8424,59	20235,44	5,87	13,32	0,50
Appui 29	195,24	0,00	-53848,52	19865,31	7,82	17,73	0,66
Appui 29	51,41	138,58	-53848,52	19907,23	7,83	17,75	0,66
Déviateur1	101,05	33,94	6635,00	20347,30	6,15	13,95	0,52
Déviateur2	148,97	0,00	7882,82	20235,44	5,94	13,48	0,50
Appui 30	195,24	0,00	-58274,38	19865,31	8,13	18,44	0,69
Appui 30	51,41	138,58	-58274,38	19907,23	8,14	18,46	0,69
Déviateur1	101,05	33,94	5149,24	20347,30	6,35	14,40	0,54
Déviateur2	148,97	0,00	14683,38	20235,44	5,03	11,41	0,43
Appui 31	195,24	0,00	-54377,04	19865,31	7,86	17,82	0,67
Appui 31	57,97	156,83	-54377,04	19708,80	7,82	17,75	0,66
Déviateur1	113,68	38,58	-4344,86	20209,15	7,58	17,19	0,64
Déviateur2	167,21	0,00	7502,82	20089,48	5,95	13,48	0,50
Appui 32	218,67	0,00	-49032,95	19677,86	7,44	16,87	0,63
Appui 32	57,97	156,83	-49032,95	19708,80	7,45	16,89	0,63

Déviateur1	113,68	38,58	669,74	20209,15	6,91	15,66	0,58
Déviateur2	167,21	0,00	14370,22	20089,48	5,02	11,39	0,43
Appui 33	218,67	0,00	-54014,53	19677,86	7,79	17,67	0,66
Appui 33	57,97	156,83	-54014,53	19708,80	7,80	17,69	0,66
Déviateur1	113,68	38,58	-1787,48	20209,15	7,24	16,41	0,61
Déviateur2	167,21	0,00	10953,52	20089,48	5,48	12,43	0,46
Appui 34	218,67	0,00	-52564,69	19677,86	7,69	17,44	0,65
Appui 34	64,08	173,99	-52564,69	19522,65	7,66	17,37	0,65
Déviateur1	125,39	43,00	-2673,92	20080,06	7,31	16,58	0,62
Déviateur2	184,07	0,00	21749,08	19954,66	3,98	9,03	0,34
Culée2	240,22	0,00	0,00	19505,47	3,94	8,94	0,33

Les pertes instantanées

Section	Pertes par frottement (%)	Pertes par recule d'encrage (%)	Pertes par raccourcissement (%)	Pertes instantanée totale (%)
Culée	3,60	9,86	0,33	13,79
Déviateur1	6,96	2,49	0,48	9,93
Déviateur2	10,06	0,00	0,63	10,69
Appui 1	12,96	0,00	0,41	13,37
Appui 1	2,67	7,29	0,42	10,39
Déviateur1	5,22	1,81	0,46	7,49
Déviateur2	7,64	0,00	0,56	8,20
Appui 2	9,94	0,00	0,45	10,40
Appui 2	2,67	7,29	0,45	10,42
Déviateur1	5,22	1,81	0,51	7,54
Déviateur2	7,64	0,00	0,60	8,24
Appui 3	9,94	0,00	0,47	10,42
Appui 3	2,56	6,96	0,47	9,99
Déviateur1	5,00	1,73	0,49	7,21
Déviateur2	7,32	0,00	0,51	7,83
Appui 4	9,54	0,00	0,44	9,98
Appui 4	3,63	10,10	0,42	14,16
Déviateur1	7,03	2,58	0,57	10,19
Déviateur2	10,21	0,00	0,58	10,79
Appui 5	13,17	0,00	0,38	13,55
Appui 5	3,63	10,10	0,37	14,11
Déviateur1	7,03	2,58	0,49	10,11
Déviateur2	10,21	0,00	0,53	10,74
Appui 6	13,17	0,00	0,36	13,53
Appui 6	3,63	10,10	0,36	14,09
Déviateur1	7,03	2,58	0,55	10,17
Déviateur2	10,21	0,00	0,73	10,93
Appui 7	13,17	0,00	0,51	13,68
Appui 7	2,02	5,47	0,53	8,02
Déviateur1	3,98	1,34	0,45	5,77
Déviateur2	5,85	0,00	0,51	6,37
Appui 8	7,67	0,00	0,61	8,28
Appui 8	2,02	5,47	0,62	8,11
Déviateur1	3,98	1,34	0,54	5,86
Déviateur2	5,85	0,00	0,52	6,38
Appui 9	7,67	0,00	0,60	8,26
Appui 9	2,02	5,47	0,60	8,09
Déviateur1	3,98	1,34	0,52	5,84

Déviateur2	5,85	0,00	0,54	6,40
Appui 10	7,67	0,00	0,60	8,27
Appui 10	2,02	5,47	0,60	8,09
Déviateur1	3,98	1,34	0,54	5,85
Déviateur2	5,85	0,00	0,54	6,39
Appui 11	7,67	0,00	0,60	8,27
Appui 11	2,02	5,47	0,60	8,09
Déviateur1	3,98	1,34	0,54	5,86
Déviateur2	5,85	0,00	0,53	6,38
Appui 12	7,67	0,00	0,60	8,27
Appui 12	2,02	5,47	0,61	8,10
Déviateur1	3,98	1,34	0,54	5,86
Déviateur2	5,85	0,00	0,54	6,40
Appui 13	7,67	0,00	0,62	8,29
Appui 13	2,02	5,47	0,62	8,11
Déviateur1	3,98	1,34	0,52	5,83
Déviateur2	5,85	0,00	0,56	6,42
Appui 14	7,67	0,00	0,61	8,27
Appui 14	2,02	5,47	0,61	8,10
Déviateur1	3,98	1,34	0,53	5,84
Déviateur2	5,85	0,00	0,56	6,41
Appui 15	7,67	0,00	0,61	8,28
Appui 15	2,02	5,47	0,61	8,10
Déviateur1	3,98	1,34	0,53	5,85
Déviateur2	5,85	0,00	0,55	6,40
Appui 16	7,67	0,00	0,61	8,27
Appui 16	2,02	5,47	0,61	8,10
Déviateur1	3,98	1,34	0,54	5,86
Déviateur2	5,85	0,00	0,55	6,41
Appui 17	7,67	0,00	0,62	8,29
Appui 17	1,92	5,17	0,62	7,72
Déviateur1	3,77	1,27	0,52	5,55
Déviateur2	5,56	0,00	0,56	6,12
Appui 18	7,29	0,00	0,67	7,96
Appui 18	1,92	5,17	0,67	7,76
Déviateur1	3,77	1,27	0,56	5,60
Déviateur2	5,56	0,00	0,45	6,01
Appui 19	7,29	0,00	0,58	7,87
Appui 19	3,17	8,71	0,56	12,44
Déviateur1	6,15	2,20	0,72	9,06
Déviateur2	8,96	0,00	0,57	9,53
Appui 20	11,62	0,00	0,41	12,03
Appui 20	3,17	8,71	0,41	12,29
Déviateur1	6,15	2,20	0,52	8,86
Déviateur2	8,96	0,00	0,55	9,52

Appui 21	11,62	0,00	0,45	12,06
Appui 21	3,17	8,71	0,45	12,32
Déviateur1	6,15	2,20	0,56	8,90
Déviateur2	8,96	0,00	0,54	9,50
Appui 22	11,62	0,00	0,43	12,05
Appui 22	3,17	8,71	0,43	12,31
Déviateur1	6,15	2,20	0,56	8,91
Déviateur2	8,96	0,00	0,58	9,54
Appui 23	11,62	0,00	0,50	12,11
Appui 23	0,85	2,30	0,97	4,12
Déviateur1	1,68	0,56	1,03	3,27
Déviateur2	2,47	0,00	1,15	3,62
Appui 24	3,24	0,00	1,09	4,33
Appui 24	1,12	3,03	1,09	5,24
Déviateur1	2,18	0,75	1,43	4,37
Déviateur2	3,20	0,00	1,32	4,52
Appui 25	4,17	0,00	0,97	5,14
Appui 25	1,12	3,03	0,97	5,12
Déviateur1	2,18	0,75	1,29	4,22
Déviateur2	3,20	0,00	1,25	4,45
Appui 26	4,17	0,00	0,99	5,16
Appui 26	1,12	3,03	0,99	5,14
Déviateur1	2,18	0,75	1,31	4,24
Déviateur2	3,20	0,00	1,30	4,50
Appui 27	4,17	0,00	1,02	5,19
Appui 27	1,92	5,17	0,57	7,66
Déviateur1	3,77	1,27	0,39	5,43
Déviateur2	5,56	0,00	0,50	6,06
Appui 28	7,29	0,00	0,70	7,99
Appui 28	1,92	5,17	0,70	7,79
Déviateur1	3,77	1,27	0,59	5,63
Déviateur2	5,56	0,00	0,50	6,06
Appui 29	7,29	0,00	0,66	7,95
Appui 29	1,92	5,17	0,66	7,76
Déviateur1	3,77	1,27	0,52	5,56
Déviateur2	5,56	0,00	0,50	6,07
Appui 30	7,29	0,00	0,69	7,98
Appui 30	1,92	5,17	0,69	7,78
Déviateur1	3,77	1,27	0,54	5,58
Déviateur2	5,56	0,00	0,43	5,99
Appui 31	7,29	0,00	0,67	7,95
Appui 31	2,16	5,86	0,66	8,68
Déviateur1	4,24	1,44	0,64	6,33
Déviateur2	6,24	0,00	0,50	6,75
Appui 32	8,16	0,00	0,63	8,79

Appui 32	2,16	5,86	0,63	8,65
Déviateur1	4,24	1,44	0,58	6,27
Déviateur2	6,24	0,00	0,43	6,67
Appui 33	8,16	0,00	0,66	8,82
Appui 33	2,16	5,86	0,66	8,68
Déviateur1	4,24	1,44	0,61	6,30
Déviateur2	6,24	0,00	0,46	6,71
Appui 34	8,16	0,00	0,65	8,82
Appui 34	2,39	6,50	0,65	9,54
Déviateur1	4,68	1,61	0,62	6,91
Déviateur2	6,87	0,00	0,34	7,21
Culée2	8,97	0,00	0,33	9,30

Les pertes dues au fluage du béton de 14 à 28 jours

Section	Perte instant	P (kN)	M (kN.m)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{fu14}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu14}$ (%)
Culée 1	13,79	18472,66	0,00	3,84	7,04	0,47
Déviateur1	9,93	19300,43	12408,61	5,01	9,19	0,62
Déviateur2	10,69	19137,47	-1044,32	6,77	12,41	0,83
Appui 1	13,37	18562,30	-33791,29	6,14	11,26	0,76
Appui 1	10,39	19201,86	-33791,29	6,27	11,49	0,77
Déviateur1	7,49	19822,38	19373,34	4,26	7,80	0,52
Déviateur2	8,20	19670,10	313,02	6,77	12,41	0,83
Appui 2	10,40	19199,22	-28604,52	5,90	10,82	0,73
Appui 2	10,42	19194,73	-28604,52	5,90	10,82	0,73
Déviateur1	7,54	19811,92	8312,66	5,74	10,53	0,71
Déviateur2	8,24	19660,98	1580,53	6,59	12,09	0,81
Appui 3	10,42	19195,08	-32020,47	6,14	11,26	0,76
Appui 3	9,99	19286,28	-32020,47	6,16	11,29	0,76
Déviateur1	7,21	19881,58	-4428,19	7,48	13,71	0,92
Déviateur2	7,83	19748,47	-10779,36	8,29	15,20	1,02
Appui 4	9,98	19288,53	-25014,12	5,66	10,39	0,70
Appui 4	14,16	18393,10	-25014,12	5,48	10,06	0,68
Déviateur1	10,19	19244,84	-6215,57	7,50	13,75	0,92
Déviateur2	10,79	19116,18	-3576,75	7,10	13,02	0,87
Appui 5	13,55	18524,10	-11140,13	4,53	8,31	0,56
Appui 5	14,11	18404,01	-11140,13	4,51	8,26	0,56
Déviateur1	10,11	19261,70	482,07	6,60	12,11	0,81
Déviateur2	10,74	19126,91	-1293,73	6,80	12,46	0,84
Appui 6	13,53	18527,57	-6006,21	4,17	7,64	0,51
Appui 6	14,09	18407,49	-6006,21	4,14	7,60	0,51
Déviateur1	10,17	19248,25	5358,96	5,94	10,90	0,73
Déviateur2	10,93	19084,25	4152,36	6,05	11,09	0,75
Appui 7	13,68	18495,60	-41276,02	6,65	12,20	0,82
Appui 7	8,02	19708,85	-41276,02	6,90	12,65	0,85
Déviateur1	5,77	20191,85	-32326,70	11,34	20,79	1,40
Déviateur2	6,37	20062,60	-32974,83	11,38	20,87	1,40
Appui 8	8,28	19652,81	-58720,31	8,12	14,89	1,00
Appui 8	8,11	19690,35	-58720,31	8,13	14,91	1,00
Déviateur1	5,86	20171,71	-34004,03	11,56	21,20	1,42
Déviateur2	6,38	20060,48	-23770,90	10,14	18,60	1,25
Appui 9	8,26	19656,87	-55455,28	7,89	14,47	0,97
Appui 9	8,09	19694,42	-55455,28	7,90	14,48	0,97
Déviateur1	5,84	20175,57	-31156,38	11,18	20,49	1,38

Déviateur2	6,40	20056,01	-20082,12	9,65	17,69	1,19
Appui 10	8,27	19655,27	-56663,39	7,98	14,63	0,98
Appui 10	8,09	19692,82	-56663,39	7,98	14,64	0,98
Déviateur1	5,85	20173,05	-33103,16	11,44	20,97	1,41
Déviateur2	6,39	20057,41	-22974,49	10,03	18,40	1,24
Appui 11	8,27	19655,19	-59747,97	8,19	15,03	1,01
Appui 11	8,09	19692,73	-59747,97	8,20	15,04	1,01
Déviateur1	5,86	20172,36	-33652,84	11,51	21,11	1,42
Déviateur2	6,38	20059,61	-22325,48	9,95	18,24	1,23
Appui 12	8,27	19654,95	-56915,28	7,99	14,66	0,99
Appui 12	8,10	19692,50	-56915,28	8,00	14,67	0,99
Déviateur1	5,86	20171,50	-32326,70	11,33	20,78	1,40
Déviateur2	6,40	20056,91	-21681,62	9,86	18,08	1,22
Appui 13	8,29	19651,09	-56607,81	7,97	14,62	0,98
Appui 13	8,11	19688,64	-56607,81	7,98	14,63	0,98
Déviateur1	5,83	20177,65	-32852,31	11,41	20,91	1,41
Déviateur2	6,42	20052,02	-22289,34	9,94	18,23	1,23
Appui 14	8,27	19654,49	-57156,22	8,01	14,69	0,99
Appui 14	8,10	19692,03	-57156,22	8,02	14,70	0,99
Déviateur1	5,84	20175,16	-32852,31	11,40	20,91	1,41
Déviateur2	6,41	20053,20	-22289,34	9,94	18,23	1,23
Appui 15	8,28	19654,08	-56663,39	7,98	14,63	0,98
Appui 15	8,10	19691,63	-56663,39	7,98	14,64	0,98
Déviateur1	5,85	20173,74	-33103,16	11,44	20,97	1,41
Déviateur2	6,40	20055,70	-22974,49	10,03	18,40	1,24
Appui 16	8,27	19654,61	-58493,90	8,10	14,86	1,00
Appui 16	8,10	19692,16	-58493,90	8,11	14,88	1,00
Déviateur1	5,86	20172,37	-33652,84	11,51	21,11	1,42
Déviateur2	6,41	20053,87	-22325,48	9,95	18,24	1,23
Appui 17	8,29	19651,39	-59059,16	8,14	14,93	1,00
Appui 17	7,72	19773,61	-59059,16	8,17	14,98	1,01
Déviateur1	5,55	20236,92	-32852,31	11,43	20,95	1,41
Déviateur2	6,12	20115,98	-22289,34	9,96	18,27	1,23
Appui 18	7,96	19722,43	-59305,20	8,18	14,99	1,01
Appui 18	7,76	19764,20	-59305,20	8,18	15,01	1,01
Déviateur1	5,60	20228,16	-33652,84	11,53	21,14	1,42
Déviateur2	6,01	20139,58	-22325,48	9,98	18,29	1,23
Appui 19	7,87	19741,04	-59059,16	8,16	14,97	1,01
Appui 19	12,44	18761,34	-59059,16	7,96	14,60	0,98
Déviateur1	9,06	19485,40	-32852,31	11,17	20,48	1,38
Déviateur2	9,53	19384,45	-22289,34	9,71	17,80	1,20
Appui 20	12,03	18849,59	-59683,33	8,03	14,72	0,99
Appui 20	12,29	18794,18	-59683,33	8,02	14,70	0,99
Déviateur1	8,86	19528,09	-33429,57	11,26	20,64	1,39
Déviateur2	9,52	19388,12	-22787,58	9,78	17,93	1,20

Appui 21	12,06	18842,06	-60219,96	8,06	14,79	0,99
Appui 21	12,32	18786,65	-60219,96	8,05	14,76	0,99
Déviateur1	8,90	19519,86	-35413,05	11,52	21,13	1,42
Déviateur2	9,50	19390,66	-24976,18	10,07	18,47	1,24
Appui 22	12,05	18845,58	-66383,33	8,50	15,59	1,05
Appui 22	12,31	18790,17	-66383,33	8,49	15,56	1,05
Déviateur1	8,91	19518,62	-38837,40	11,98	21,97	1,48
Déviateur2	9,54	19382,84	-27421,36	10,40	19,07	1,28
Appui 23	12,11	18831,38	-70366,57	8,78	16,10	1,08
Appui 23	4,12	20543,71	-70366,57	9,12	16,73	1,12
Déviateur1	3,27	20725,51	-42556,06	12,90	23,66	1,59
Déviateur2	3,62	20651,49	-31019,73	11,32	20,76	1,40
Appui 24	4,33	20498,56	-72631,45	9,27	17,01	1,14
Appui 24	5,24	20305,12	-72631,45	9,24	16,94	1,14
Déviateur1	4,37	20491,59	-46073,74	13,29	24,38	1,64
Déviateur2	4,52	20459,59	-34709,02	11,75	21,55	1,45
Appui 25	5,14	20325,86	-47897,25	7,49	13,74	0,92
Appui 25	5,12	20329,72	-47897,25	7,49	13,74	0,92
Déviateur1	4,22	20523,22	-23701,01	10,29	18,88	1,27
Déviateur2	4,45	20473,53	-15118,57	9,12	16,73	1,12
Appui 26	5,16	20321,88	-60537,38	8,38	15,37	1,03
Appui 26	5,14	20325,74	-60537,38	8,38	15,38	1,03
Déviateur1	4,24	20518,25	-32890,23	11,53	21,14	1,42
Déviateur2	4,50	20463,71	-23605,61	10,26	18,81	1,26
Appui 27	5,19	20316,12	-40074,69	6,94	12,72	0,85
Appui 27	7,66	19785,64	-40074,69	6,83	12,52	0,84
Déviateur1	5,43	20264,42	-16934,37	9,29	17,04	1,15
Déviateur2	6,06	20127,94	-10525,98	8,38	15,37	1,03
Appui 28	7,99	19715,41	-24337,55	5,70	10,46	0,70
Appui 28	7,79	19757,18	-24337,55	5,71	10,47	0,70
Déviateur1	5,63	20220,26	-6686,53	7,90	14,49	0,97
Déviateur2	6,06	20128,91	-251,20	7,00	12,84	0,86
Appui 29	7,95	19723,46	-21353,74	5,49	10,07	0,68
Appui 29	7,76	19765,22	-21353,74	5,50	10,09	0,68
Déviateur1	5,56	20235,70	-13467,27	8,82	16,17	1,09
Déviateur2	6,07	20127,59	-7332,22	7,95	14,59	0,98
Appui 30	7,98	19717,78	-18531,82	5,29	9,71	0,65
Appui 30	7,78	19759,55	-18531,82	5,30	9,72	0,65
Déviateur1	5,58	20232,07	-10332,72	8,39	15,39	1,03
Déviateur2	5,99	20144,19	-3794,50	7,48	13,72	0,92
Appui 31	7,95	19722,78	-11140,13	4,77	8,75	0,59
Appui 31	8,68	19566,84	-11140,13	4,74	8,69	0,58
Déviateur1	6,33	20071,62	-6006,21	7,76	14,22	0,96
Déviateur2	6,75	19981,62	-2304,31	7,23	13,25	0,89
Appui 32	8,79	19542,86	-24337,55	5,67	10,39	0,70

Appui 32	8,65	19573,69	-24337,55	5,67	10,41	0,70
Déviateur1	6,27	20083,86	-6686,53	7,85	14,40	0,97
Déviateur2	6,67	19998,39	-251,20	6,96	12,76	0,86
Appui 33	8,82	19536,48	-21353,74	5,46	10,00	0,67
Appui 33	8,68	19567,30	-21353,74	5,46	10,02	0,67
Déviateur1	6,30	20077,86	-13467,27	8,76	16,07	1,08
Déviateur2	6,71	19990,05	-7332,22	7,91	14,50	0,97
Appui 34	8,82	19538,34	-24337,55	5,67	10,39	0,70
Appui 34	9,54	19383,70	-24337,55	5,64	10,34	0,69
Déviateur1	6,91	19947,41	-6686,53	7,81	14,31	0,96
Déviateur2	7,21	19882,42	-251,20	6,92	12,68	0,85
Culée2	9,30	19433,98	0,00	3,93	7,20	0,48

Les pertes dues au fluage du béton de 28 à ∞ jours

Section	Perte instant (%)	P (kN)	M (kN.m)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu}$ (%)
Culée	13,79	18371,33	0,00	3,82	51,90	3,49
Déviateur1	9,93	19168,08	12408,61	4,97	67,53	4,54
Déviateur2	10,69	18958,82	-1044,32	6,70	91,16	6,13
Appui 1	13,37	18400,21	-33791,29	6,11	83,02	5,58
Appui 1	10,39	19036,36	-33791,29	6,23	84,77	5,70
Déviateur1	7,49	19710,01	19373,34	4,22	57,34	3,85
Déviateur2	8,20	19491,40	313,02	6,71	91,18	6,13
Appui 2	10,40	19043,42	-28604,52	5,87	79,80	5,36
Appui 2	10,42	19038,95	-28604,52	5,87	79,79	5,36
Déviateur1	7,54	19660,35	8312,66	5,69	77,34	5,20
Déviateur2	8,24	19486,86	1580,53	6,53	88,84	5,97
Appui 3	10,42	19032,92	-32020,47	6,11	83,06	5,58
Appui 3	9,99	19123,63	-32020,47	6,13	83,31	5,60
Déviateur1	7,21	19684,10	-4428,19	7,41	100,76	6,77
Déviateur2	7,83	19529,64	-10779,36	8,21	111,66	7,50
Appui 4	9,98	19138,95	-25014,12	5,63	76,62	5,15
Appui 4	14,16	18248,29	-25014,12	5,45	74,17	4,98
Déviateur1	10,19	19046,83	-6215,57	7,43	101,03	6,79
Déviateur2	10,79	18928,73	-3576,75	7,03	95,65	6,43
Appui 5	13,55	18404,49	-11140,13	4,51	61,26	4,12
Appui 5	14,11	18285,04	-11140,13	4,48	60,94	4,10
Déviateur1	10,11	19087,34	482,07	6,54	88,97	5,98
Déviateur2	10,74	18947,47	-1293,73	6,73	91,56	6,15
Appui 6	13,53	18417,53	-6006,21	4,15	56,37	3,79
Appui 6	14,09	18298,09	-6006,21	4,12	56,04	3,77
Déviateur1	10,17	19091,33	5358,96	5,89	80,07	5,38
Déviateur2	10,93	18924,54	4152,36	5,99	81,49	5,48
Appui 7	13,68	18319,89	-41276,02	6,62	90,00	6,05
Appui 7	8,02	19526,68	-41276,02	6,86	93,31	6,27
Déviateur1	5,77	19892,42	-32326,70	11,24	152,79	10,27
Déviateur2	6,37	19762,04	-32974,83	11,28	153,36	10,31
Appui 8	8,28	19438,37	-58720,31	8,08	109,83	7,38
Appui 8	8,11	19475,72	-58720,31	8,08	109,94	7,39
Déviateur1	5,86	19866,50	-34004,03	11,45	155,73	10,47
Déviateur2	6,38	19792,65	-23770,90	10,05	136,66	9,18
Appui 9	8,26	19448,51	-55455,28	7,85	106,72	7,17
Appui 9	8,09	19485,86	-55455,28	7,86	106,83	7,18

Déviateur1	5,84	19880,45	-31156,38	11,07	150,59	10,12
Déviateur2	6,40	19801,32	-20082,12	9,56	129,95	8,73
Appui 10	8,27	19444,66	-56663,39	7,93	107,87	7,25
Appui 10	8,09	19482,01	-56663,39	7,94	107,98	7,26
Déviateur1	5,85	19871,03	-33103,16	11,33	154,11	10,36
Déviateur2	6,39	19792,43	-22974,49	9,94	135,20	9,09
Appui 11	8,27	19438,82	-59747,97	8,15	110,82	7,45
Appui 11	8,09	19476,17	-59747,97	8,16	110,93	7,45
Déviateur1	5,86	19868,39	-33652,84	11,41	155,10	10,42
Déviateur2	6,38	19796,92	-22325,48	9,86	134,04	9,01
Appui 12	8,27	19443,88	-56915,28	7,95	108,11	7,27
Appui 12	8,10	19481,22	-56915,28	7,96	108,22	7,27
Déviateur1	5,86	19872,25	-32326,70	11,23	152,69	10,26
Déviateur2	6,40	19796,53	-21681,62	9,77	132,86	8,93
Appui 13	8,29	19440,61	-56607,81	7,93	107,81	7,25
Appui 13	8,11	19477,96	-56607,81	7,94	107,91	7,25
Déviateur1	5,83	19876,48	-32852,31	11,30	153,67	10,33
Déviateur2	6,42	19789,52	-22289,34	9,85	133,94	9,00
Appui 14	8,27	19442,96	-57156,22	7,97	108,34	7,28
Appui 14	8,10	19480,31	-57156,22	7,98	108,45	7,29
Déviateur1	5,84	19874,01	-32852,31	11,30	153,66	10,33
Déviateur2	6,41	19790,70	-22289,34	9,85	133,94	9,00
Appui 15	8,28	19443,48	-56663,39	7,93	107,87	7,25
Appui 15	8,10	19480,83	-56663,39	7,94	107,97	7,26
Déviateur1	5,85	19871,71	-33103,16	11,33	154,11	10,36
Déviateur2	6,40	19790,74	-22974,49	9,94	135,20	9,09
Appui 16	8,27	19440,59	-58493,90	8,06	109,62	7,37
Appui 16	8,10	19477,94	-58493,90	8,07	109,73	7,37
Déviateur1	5,86	19868,40	-33652,84	11,41	155,10	10,42
Déviateur2	6,41	19791,23	-22325,48	9,86	134,01	9,01
Appui 17	8,29	19436,33	-59059,16	8,10	110,15	7,40
Appui 17	7,72	19557,90	-59059,16	8,13	110,49	7,43
Déviateur1	5,55	19935,21	-32852,31	11,32	153,95	10,35
Déviateur2	6,12	19852,90	-22289,34	9,87	134,24	9,02
Appui 18	7,96	19506,53	-59305,20	8,13	110,58	7,43
Appui 18	7,76	19548,08	-59305,20	8,14	110,70	7,44
Déviateur1	5,60	19923,68	-33652,84	11,43	155,36	10,44
Déviateur2	6,01	19876,16	-22325,48	9,88	134,41	9,03
Appui 19	7,87	19525,50	-59059,16	8,12	110,40	7,42
Appui 19	12,44	18551,03	-59059,16	7,92	107,72	7,24
Déviateur1	9,06	19190,56	-32852,31	11,06	150,44	10,11
Déviateur2	9,53	19128,06	-22289,34	9,62	130,82	8,79
Appui 20	12,03	18637,64	-59683,33	7,98	108,56	7,30
Appui 20	12,29	18582,53	-59683,33	7,97	108,41	7,29
Déviateur1	8,86	19230,80	-33429,57	11,16	151,69	10,19

Déviateur2	9,52	19129,93	-22787,58	9,69	131,74	8,85
Appui 21	12,06	18629,15	-60219,96	8,02	109,05	7,33
Appui 21	12,32	18574,04	-60219,96	8,01	108,90	7,32
Déviateur1	8,90	19215,60	-35413,05	11,42	155,25	10,43
Déviateur2	9,50	19124,67	-24976,18	9,98	135,72	9,12
Appui 22	12,05	18621,15	-66383,33	8,45	114,95	7,73
Appui 22	12,31	18566,04	-66383,33	8,44	114,80	7,72
Déviateur1	8,91	19202,21	-38837,40	11,87	161,45	10,85
Déviateur2	9,54	19108,23	-27421,36	10,30	140,12	9,42
Appui 23	12,11	18599,59	-70366,57	8,73	118,72	7,98
Appui 23	4,12	20302,79	-70366,57	9,08	123,40	8,29
Déviateur1	3,27	20384,85	-42556,06	12,78	173,82	11,68
Déviateur2	3,62	20352,50	-31019,73	11,22	152,56	10,25
Appui 24	4,33	20253,65	-72631,45	9,23	125,44	8,43
Appui 24	5,24	20061,25	-72631,45	9,19	124,92	8,39
Déviateur1	4,37	20140,57	-46073,74	13,17	179,10	12,04
Déviateur2	4,52	20149,24	-34709,02	11,65	158,35	10,64
Appui 25	5,14	20128,03	-47897,25	7,45	101,33	6,81
Appui 25	5,12	20131,88	-47897,25	7,45	101,34	6,81
Déviateur1	4,22	20251,41	-23701,01	10,20	138,69	9,32
Déviateur2	4,45	20232,66	-15118,57	9,04	122,90	8,26
Appui 26	5,16	20100,48	-60537,38	8,34	113,40	7,62
Appui 26	5,14	20104,32	-60537,38	8,34	113,41	7,62
Déviateur1	4,24	20213,83	-32890,23	11,42	155,33	10,44
Déviateur2	4,50	20192,78	-23605,61	10,17	138,24	9,29
Appui 27	5,19	20132,95	-40074,69	6,90	93,82	6,31
Appui 27	7,66	19605,30	-40074,69	6,79	92,37	6,21
Déviateur1	5,43	20019,01	-16934,37	9,21	125,22	8,42
Déviateur2	6,06	19906,54	-10525,98	8,31	112,97	7,59
Appui 28	7,99	19564,81	-24337,55	5,67	77,14	5,18
Appui 28	7,79	19606,36	-24337,55	5,68	77,25	5,19
Déviateur1	5,63	20011,66	-6686,53	7,83	106,44	7,15
Déviateur2	6,06	19944,01	-251,20	6,94	94,34	6,34
Appui 29	7,95	19578,39	-21353,74	5,46	74,31	4,99
Appui 29	7,76	19619,93	-21353,74	5,47	74,42	5,00
Déviateur1	5,56	20002,87	-13467,27	8,74	118,80	7,98
Déviateur2	6,07	19917,54	-7332,22	7,88	107,17	7,20
Appui 30	7,98	19578,01	-18531,82	5,26	71,59	4,81
Appui 30	7,78	19619,55	-18531,82	5,27	71,71	4,82
Déviateur1	5,58	20010,41	-10332,72	8,32	113,10	7,60
Déviateur2	5,99	19946,56	-3794,50	7,42	100,84	6,78
Appui 31	7,95	19596,78	-11140,13	4,75	64,54	4,34
Appui 31	8,68	19441,67	-11140,13	4,71	64,11	4,31
Déviateur1	6,33	19866,80	-6006,21	7,69	104,51	7,02
Déviateur2	6,75	19790,78	-2304,31	7,16	97,38	6,54

Appui 32	8,79	19393,19	-24337,55	5,64	76,66	5,15
Appui 32	8,65	19423,85	-24337,55	5,64	76,75	5,16
Déviateur1	6,27	19876,51	-6686,53	7,78	105,80	7,11
Déviateur2	6,67	19814,68	-251,20	6,89	93,74	6,30
Appui 33	8,82	19392,41	-21353,74	5,43	73,79	4,96
Appui 33	8,68	19423,07	-21353,74	5,43	73,88	4,96
Déviateur1	6,30	19846,48	-13467,27	8,68	118,06	7,93
Déviateur2	6,71	19781,26	-7332,22	7,83	106,53	7,16
Appui 34	8,82	19388,69	-24337,55	5,64	76,65	5,15
Appui 34	9,54	19234,87	-24337,55	5,61	76,23	5,12
Déviateur1	6,91	19741,31	-6686,53	7,73	105,16	7,07
Déviateur2	7,21	19699,78	-251,20	6,85	93,19	6,26
Culée2	9,30	19330,31	0,00	3,90	53,10	3,57

Les pertes dues à la Relaxation des aciers :

Section	X(m)	σ_{bi} (Mpa)	$\Delta\sigma_{rel}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{rel}$ (%)
Culée	0,00	1282,82	58,56	3,94
Déviateur1	8,83	1340,31	67,42	4,53
Déviateur2	19,88	1328,99	65,63	4,41
Appui 1	26,50	1289,05	59,50	4,00
Appui 1	26,50	1333,46	66,33	4,46
Déviateur1	35,50	1376,55	73,27	4,92
Déviateur2	53,50	1365,98	71,54	4,81
Appui 2	62,50	1333,28	66,30	4,46
Appui 2	62,50	1332,97	66,25	4,45
Déviateur1	71,50	1375,83	73,15	4,92
Déviateur2	89,50	1365,35	71,44	4,80
Appui 3	98,50	1332,99	66,26	4,45
Appui 3	98,50	1339,32	67,26	4,52
Déviateur1	107,94	1380,67	73,95	4,97
Déviateur2	126,81	1371,42	72,43	4,87
Appui 4	136,25	1339,48	67,28	4,52
Appui 4	136,25	1277,30	57,74	3,88
Déviateur1	142,69	1336,45	66,80	4,49
Déviateur2	155,56	1327,51	65,40	4,40
Appui 5	162,00	1286,40	59,10	3,97
Appui 5	162,00	1278,06	57,85	3,89
Déviateur1	168,44	1337,62	66,99	4,50
Déviateur2	181,31	1328,26	65,52	4,40
Appui 6	187,75	1286,64	59,13	3,97
Appui 6	187,75	1278,30	57,89	3,89
Déviateur1	194,19	1336,68	66,84	4,49
Déviateur2	207,06	1325,30	65,05	4,37
Appui 7	213,50	1284,42	58,80	3,95
Appui 7	213,50	1368,67	71,98	4,84
Déviateur1	225,56	1402,21	77,55	5,21
Déviateur2	249,69	1393,24	76,04	5,11
Appui 8	261,75	1364,78	71,35	4,79
Appui 8	261,75	1367,39	71,77	4,82
Déviateur1	273,81	1400,81	77,31	5,20
Déviateur2	297,94	1393,09	76,01	5,11
Appui 9	310,00	1365,06	71,39	4,80
Appui 9	310,00	1367,67	71,82	4,83
Déviateur1	322,06	1401,08	77,36	5,20
Déviateur2	346,19	1392,78	75,96	5,10
Appui 10	358,25	1364,95	71,37	4,80

Appui 10	358,25	1367,56	71,80	4,83
Déviateur1	370,31	1400,91	77,33	5,20
Déviateur2	394,44	1392,88	75,98	5,11
Appui 11	406,50	1364,94	71,37	4,80
Appui 11	406,50	1367,55	71,80	4,83
Déviateur1	418,56	1400,86	77,32	5,20
Déviateur2	442,69	1393,03	76,00	5,11
Appui 12	454,75	1364,93	71,37	4,80
Appui 12	454,75	1367,53	71,79	4,82
Déviateur1	466,81	1400,80	77,31	5,20
Déviateur2	490,94	1392,84	75,97	5,11
Appui 13	503,00	1364,66	71,33	4,79
Appui 13	503,00	1367,27	71,75	4,82
Déviateur1	515,06	1401,23	77,38	5,20
Déviateur2	539,19	1392,50	75,92	5,10
Appui 14	551,25	1364,89	71,36	4,80
Appui 14	551,25	1367,50	71,79	4,82
Déviateur1	563,31	1401,05	77,35	5,20
Déviateur2	587,44	1392,58	75,93	5,10
Appui 15	599,50	1364,87	71,36	4,80
Appui 15	599,50	1367,47	71,78	4,82
Déviateur1	611,56	1400,95	77,33	5,20
Déviateur2	635,69	1392,76	75,96	5,10
Appui 16	647,75	1364,90	71,37	4,80
Appui 16	647,75	1367,51	71,79	4,82
Déviateur1	659,81	1400,86	77,32	5,20
Déviateur2	683,94	1392,63	75,94	5,10
Appui 17	696,00	1364,68	71,33	4,79
Appui 17	696,00	1373,17	72,72	4,89
Déviateur1	708,75	1405,34	78,07	5,25
Déviateur2	734,25	1396,94	76,66	5,15
Appui 18	747,00	1369,61	72,13	4,85
Appui 18	747,00	1372,51	72,61	4,88
Déviateur1	759,75	1404,73	77,97	5,24
Déviateur2	785,25	1398,58	76,93	5,17
Appui 19	798,00	1370,91	72,35	4,86
Appui 19	798,00	1302,87	61,59	4,14
Déviateur1	805,50	1353,15	69,47	4,67
Déviateur2	820,50	1346,14	68,34	4,59
Appui 20	828,00	1309,00	62,53	4,20
Appui 20	828,00	1305,15	61,94	4,16
Déviateur1	835,50	1356,12	69,94	4,70
Déviateur2	850,50	1346,40	68,38	4,60
Appui 21	858,00	1308,48	62,45	4,20
Appui 21	858,00	1304,63	61,86	4,16

Déviateur1	865,50	1355,55	69,85	4,69
Déviateur2	880,50	1346,57	68,41	4,60
Appui 22	888,00	1308,72	62,48	4,20
Appui 22	888,00	1304,87	61,90	4,16
Déviateur1	895,50	1355,46	69,84	4,69
Déviateur2	910,50	1346,03	68,33	4,59
Appui 23	918,00	1307,73	62,33	4,19
Appui 23	918,00	1426,65	81,72	5,49
Déviateur1	930,75	1439,27	83,91	5,64
Déviateur2	956,25	1434,13	83,01	5,58
Appui 24	969,00	1423,51	81,17	5,46
Appui 24	969,00	1410,08	78,88	5,30
Déviateur1	978,63	1423,03	81,09	5,45
Déviateur2	997,88	1420,80	80,71	5,42
Appui 25	1007,50	1411,52	79,12	5,32
Appui 25	1007,50	1411,79	79,17	5,32
Déviateur1	1017,13	1425,22	81,47	5,48
Déviateur2	1036,38	1421,77	80,88	5,44
Appui 26	1046,00	1411,24	79,08	5,31
Appui 26	1046,00	1411,51	79,12	5,32
Déviateur1	1055,63	1424,88	81,41	5,47
Déviateur2	1074,88	1421,09	80,76	5,43
Appui 27	1084,50	1410,84	79,01	5,31
Appui 27	1084,50	1374,00	72,85	4,90
Déviateur1	1097,25	1407,25	78,40	5,27
Déviateur2	1122,75	1397,77	76,80	5,16
Appui 28	1135,50	1369,13	72,05	4,84
Appui 28	1135,50	1372,03	72,53	4,87
Déviateur1	1148,25	1404,18	77,88	5,23
Déviateur2	1173,75	1397,84	76,81	5,16
Appui 29	1186,50	1369,68	72,15	4,85
Appui 29	1186,50	1372,59	72,62	4,88
Déviateur1	1199,25	1405,26	78,06	5,25
Déviateur2	1224,75	1397,75	76,79	5,16
Appui 30	1237,50	1369,29	72,08	4,84
Appui 30	1237,50	1372,19	72,56	4,88
Déviateur1	1250,25	1405,00	78,02	5,24
Déviateur2	1275,75	1398,90	76,99	5,17
Appui 31	1288,50	1369,64	72,14	4,85
Appui 31	1288,50	1358,81	70,38	4,73
Déviateur1	1299,75	1393,86	76,14	5,12
Déviateur2	1322,25	1387,61	75,10	5,05
Appui 32	1333,50	1357,14	70,11	4,71
Appui 32	1333,50	1359,28	70,45	4,73
Déviateur1	1344,75	1394,71	76,29	5,13

Déviateur2	1367,25	1388,78	75,29	5,06
Appui 33	1378,50	1356,70	70,04	4,71
Appui 33	1378,50	1358,84	70,38	4,73
Déviateur1	1389,75	1394,30	76,22	5,12
Déviateur2	1412,25	1388,20	75,20	5,05
Appui 34	1423,50	1356,83	70,06	4,71
Appui 34	1423,50	1346,09	68,34	4,59
Déviateur1	1433,63	1385,24	74,71	5,02
Déviateur2	1453,88	1380,72	73,96	4,97
Culée2	1464,00	1349,58	68,89	4,63

Les pertes totales des câbles extérieurs

Section	$\Delta\sigma_{pi}\%$	$\Delta\sigma_{ret}\%$	$\Delta\sigma_{flu}\%$	$5/6\Delta\sigma_{rel}\%$	$\%\Delta\sigma_{pd}$	Perte totale
Culée	13,79	1,97	3,49	3,28	8,73	22,52
Déviateur1	9,93	1,09	4,54	3,78	9,41	19,33
Déviateur2	10,69	1,09	6,13	3,68	10,89	21,58
Appui 1	13,37	1,09	5,58	3,33	10,00	23,37
Appui 1	10,39	1,09	5,70	3,71	10,50	20,89
Déviateur1	7,49	1,09	3,85	4,10	9,05	16,54
Déviateur2	8,20	1,09	6,13	4,01	11,23	19,43
Appui 2	10,40	1,09	5,36	3,71	10,17	20,57
Appui 2	10,42	1,09	5,36	3,71	10,16	20,58
Déviateur1	7,54	1,09	5,20	4,10	10,39	17,92
Déviateur2	8,24	1,09	5,97	4,00	11,06	19,31
Appui 3	10,42	1,09	5,58	3,71	10,38	20,80
Appui 3	9,99	1,09	5,60	3,77	10,46	20,45
Déviateur1	7,21	1,09	6,77	4,14	12,01	19,22
Déviateur2	7,83	1,09	7,50	4,06	12,65	20,49
Appui 4	9,98	1,09	5,15	3,77	10,01	19,99
Appui 4	14,16	1,09	4,98	3,23	9,31	23,47
Déviateur1	10,19	1,09	6,79	3,74	11,62	21,81
Déviateur2	10,79	1,09	6,43	3,66	11,18	21,97
Appui 5	13,55	1,09	4,12	3,31	8,52	22,07
Appui 5	14,11	1,09	4,10	3,24	8,43	22,54
Déviateur1	10,11	1,09	5,98	3,75	10,82	20,93
Déviateur2	10,74	1,09	6,15	3,67	10,91	21,65
Appui 6	13,53	1,09	3,79	3,31	8,19	21,72
Appui 6	14,09	1,09	3,77	3,24	8,10	22,19
Déviateur1	10,17	1,09	5,38	3,74	10,22	20,39
Déviateur2	10,93	1,09	5,48	3,64	10,21	21,15
Appui 7	13,68	1,09	6,05	3,29	10,43	24,11
Appui 7	8,02	1,09	6,27	4,03	11,39	19,41
Déviateur1	5,77	1,09	10,27	4,34	15,70	21,47
Déviateur2	6,37	1,09	10,31	4,26	15,66	22,03
Appui 8	8,28	1,09	7,38	4,00	12,47	20,75
Appui 8	8,11	1,09	7,39	4,02	12,50	20,61
Déviateur1	5,86	1,09	10,47	4,33	15,89	21,75
Déviateur2	6,38	1,09	9,18	4,26	14,53	20,91
Appui 9	8,26	1,09	7,17	4,00	12,26	20,52
Appui 9	8,09	1,09	7,18	4,02	12,29	20,38
Déviateur1	5,84	1,09	10,12	4,33	15,54	21,39
Déviateur2	6,40	1,09	8,73	4,25	14,08	20,48
Appui 10	8,27	1,09	7,25	4,00	12,34	20,61

Appui 10	8,09	1,09	7,26	4,02	12,37	20,46
Déviateur1	5,85	1,09	10,36	4,33	15,78	21,63
Déviateur2	6,39	1,09	9,09	4,26	14,43	20,83
Appui 11	8,27	1,09	7,45	4,00	12,54	20,81
Appui 11	8,09	1,09	7,45	4,02	12,57	20,66
Déviateur1	5,86	1,09	10,42	4,33	15,85	21,70
Déviateur2	6,38	1,09	9,01	4,26	14,36	20,74
Appui 12	8,27	1,09	7,27	4,00	12,35	20,63
Appui 12	8,10	1,09	7,27	4,02	12,39	20,48
Déviateur1	5,86	1,09	10,26	4,33	15,68	21,54
Déviateur2	6,40	1,09	8,93	4,25	14,28	20,67
Appui 13	8,29	1,09	7,25	3,99	12,33	20,62
Appui 13	8,11	1,09	7,25	4,02	12,36	20,48
Déviateur1	5,83	1,09	10,33	4,33	15,75	21,58
Déviateur2	6,42	1,09	9,00	4,25	14,34	20,76
Appui 14	8,27	1,09	7,28	4,00	12,37	20,64
Appui 14	8,10	1,09	7,29	4,02	12,40	20,50
Déviateur1	5,84	1,09	10,33	4,33	15,75	21,59
Déviateur2	6,41	1,09	9,00	4,25	14,35	20,76
Appui 15	8,28	1,09	7,25	4,00	12,34	20,61
Appui 15	8,10	1,09	7,26	4,02	12,37	20,47
Déviateur1	5,85	1,09	10,36	4,33	15,78	21,63
Déviateur2	6,40	1,09	9,09	4,25	14,43	20,83
Appui 16	8,27	1,09	7,37	4,00	12,46	20,73
Appui 16	8,10	1,09	7,37	4,02	12,49	20,58
Déviateur1	5,86	1,09	10,42	4,33	15,85	21,70
Déviateur2	6,41	1,09	9,01	4,25	14,35	20,76
Appui 17	8,29	1,09	7,40	3,99	12,49	20,78
Appui 17	7,72	1,09	7,43	4,07	12,59	20,31
Déviateur1	5,55	1,09	10,35	4,37	15,81	21,37
Déviateur2	6,12	1,09	9,02	4,29	14,41	20,53
Appui 18	7,96	1,09	7,43	4,04	12,56	20,52
Appui 18	7,76	1,09	7,44	4,07	12,60	20,36
Déviateur1	5,60	1,09	10,44	4,37	15,90	21,50
Déviateur2	6,01	1,09	9,03	4,31	14,43	20,44
Appui 19	7,87	1,09	7,42	4,05	12,56	20,43
Appui 19	12,44	1,09	7,24	3,45	11,78	24,22
Déviateur1	9,06	1,09	10,11	3,89	15,09	24,16
Déviateur2	9,53	1,09	8,79	3,83	13,71	23,24
Appui 20	12,03	1,09	7,30	3,50	11,89	23,92
Appui 20	12,29	1,09	7,29	3,47	11,85	24,13
Déviateur1	8,86	1,09	10,19	3,92	15,20	24,07
Déviateur2	9,52	1,09	8,85	3,83	13,78	23,29
Appui 21	12,06	1,09	7,33	3,50	11,92	23,98
Appui 21	12,32	1,09	7,32	3,46	11,87	24,20

Déviateur1	8,90	1,09	10,43	3,91	15,44	24,34
Déviateur2	9,50	1,09	9,12	3,83	14,04	23,55
Appui 22	12,05	1,09	7,73	3,50	12,32	24,37
Appui 22	12,31	1,09	7,72	3,47	12,27	24,58
Déviateur1	8,91	1,09	10,85	3,91	15,85	24,76
Déviateur2	9,54	1,09	9,42	3,83	14,34	23,88
Appui 23	12,11	1,09	7,98	3,49	12,56	24,68
Appui 23	4,12	1,09	8,29	4,58	13,96	18,08
Déviateur1	3,27	1,09	11,68	4,70	17,47	20,75
Déviateur2	3,62	1,09	10,25	4,65	15,99	19,61
Appui 24	4,33	1,09	8,43	4,55	14,07	18,40
Appui 24	5,24	1,09	8,39	4,42	13,90	19,14
Déviateur1	4,37	1,09	12,04	4,54	17,67	22,04
Déviateur2	4,52	1,09	10,64	4,52	16,25	20,77
Appui 25	5,14	1,09	6,81	4,43	12,33	17,47
Appui 25	5,12	1,09	6,81	4,43	12,34	17,46
Déviateur1	4,22	1,09	9,32	4,56	14,98	19,19
Déviateur2	4,45	1,09	8,26	4,53	13,88	18,33
Appui 26	5,16	1,09	7,62	4,43	13,14	18,30
Appui 26	5,14	1,09	7,62	4,43	13,14	18,29
Déviateur1	4,24	1,09	10,44	4,56	16,09	20,33
Déviateur2	4,50	1,09	9,29	4,52	14,91	19,40
Appui 27	5,19	1,09	6,31	4,42	11,82	17,01
Appui 27	7,66	1,09	6,21	4,08	11,38	19,04
Déviateur1	5,43	1,09	8,42	4,39	13,90	19,32
Déviateur2	6,06	1,09	7,59	4,30	12,98	19,05
Appui 28	7,99	1,09	5,18	4,04	10,31	18,30
Appui 28	7,79	1,09	5,19	4,06	10,35	18,14
Déviateur1	5,63	1,09	7,15	4,36	12,61	18,24
Déviateur2	6,06	1,09	6,34	4,30	11,73	17,79
Appui 29	7,95	1,09	4,99	4,04	10,13	18,08
Appui 29	7,76	1,09	5,00	4,07	10,16	17,92
Déviateur1	5,56	1,09	7,98	4,37	13,45	19,01
Déviateur2	6,07	1,09	7,20	4,30	12,60	18,66
Appui 30	7,98	1,09	4,81	4,04	9,94	17,92
Appui 30	7,78	1,09	4,82	4,06	9,97	17,76
Déviateur1	5,58	1,09	7,60	4,37	13,06	18,64
Déviateur2	5,99	1,09	6,78	4,31	12,18	18,17
Appui 31	7,95	1,09	4,34	4,04	9,47	17,42
Appui 31	8,68	1,09	4,31	3,94	9,34	18,02
Déviateur1	6,33	1,09	7,02	4,26	12,38	18,71
Déviateur2	6,75	1,09	6,54	4,21	11,84	18,59
Appui 32	8,79	1,09	5,15	3,93	10,17	18,96
Appui 32	8,65	1,09	5,16	3,95	10,20	18,85
Déviateur1	6,27	1,09	7,11	4,27	12,47	18,74

Déviateur2	6,67	1,09	6,30	4,22	11,61	18,28
Appui 33	8,82	1,09	4,96	3,92	9,97	18,80
Appui 33	8,68	1,09	4,96	3,94	10,00	18,68
Déviateur1	6,30	1,09	7,93	4,27	13,29	19,59
Déviateur2	6,71	1,09	7,16	4,21	12,46	19,17
Appui 34	8,82	1,09	5,15	3,92	10,17	18,98
Appui 34	9,54	1,09	5,12	3,83	10,04	19,58
Déviateur1	6,91	1,09	7,07	4,18	12,34	19,25
Déviateur2	7,21	1,09	6,26	4,14	11,50	18,71
Culée2	9,30	1,09	3,57	3,86	8,52	17,82

Annexe B

Calcul des pertes pour la précontrainte de poussage

Les pertes Par Frottement

Section	$l(m)$	$\alpha_i (rd)$	$f(rd^{-1})$	$\Psi(m^{-1})$	$\Delta\sigma_{frot}$	$\Delta\sigma_{frot} (%)$
Culée 1	0,00	0,3038	0,2	0,0016	90,41	6,08
Déviateur1	8,83	0,3038	0,2	0,0016	111,44	7,49
Déviateur2	19,88	0,3038	0,2	0,0016	137,73	9,26
Appui 1	7,00	0,3038	0,2	0,0016	107,08	7,20
Déviateur1	16,00	0,3038	0,2	0,0016	128,50	8,64
Déviateur2	16,50	0,3038	0,2	0,0016	129,69	8,72
Appui 2	8,00	0,3038	0,2	0,0016	109,46	7,36
Déviateur1	17,00	0,3038	0,2	0,0016	130,88	8,80
Déviateur2	5,00	0,3038	0,2	0,0016	102,31	6,88
Appui 3	14,00	0,3038	0,2	0,0016	123,74	8,32
Déviateur1	23,44	0,3038	0,2	0,0016	146,21	9,83
Déviateur2	11,31	0,3038	0,2	0,0016	117,34	7,89
Appui 4	20,75	0,3038	0,2	0,0016	139,81	9,40
Déviateur1	27,19	0,3038	0,2	0,0016	155,14	10,43
Déviateur2	9,06	0,3038	0,2	0,0016	111,99	7,53
Appui 5	15,50	0,3038	0,2	0,0016	127,31	8,56
Déviateur1	21,94	0,3038	0,2	0,0016	142,64	9,59
Déviateur2	9,06	0,3038	0,2	0,0016	111,99	7,53
Appui 6	15,50	0,3038	0,2	0,0016	127,31	8,56
Déviateur1	21,94	0,3038	0,2	0,0016	142,64	9,59
Déviateur2	9,06	0,3038	0,2	0,0016	111,99	7,53
Appui 7	15,50	0,3038	0,2	0,0016	127,31	8,56
Déviateur1	0,31	0,3038	0,2	0,0016	91,15	6,13
Déviateur2	24,44	0,3038	0,2	0,0016	148,59	9,99
Appui 8	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	0,31	0,3038	0,2	0,0016	91,15	6,13
Déviateur2	24,44	0,3038	0,2	0,0016	148,59	9,99
Appui 9	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	0,31	0,3038	0,2	0,0016	91,15	6,13
Déviateur2	24,44	0,3038	0,2	0,0016	148,59	9,99
Appui 10	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	0,31	0,3038	0,2	0,0016	91,15	6,13
Déviateur2	24,44	0,3038	0,2	0,0016	148,59	9,99
Appui 11	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	0,31	0,3038	0,2	0,0016	91,15	6,13
Déviateur2	24,44	0,3038	0,2	0,0016	148,59	9,99

Appui 12	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	0,31	0,3038	0,2	0,0016	91,15	6,13
Déviateur2	24,44	0,3038	0,2	0,0016	148,59	9,99
Appui 13	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	0,31	0,3038	0,2	0,0016	91,15	6,13
Déviateur2	24,44	0,3038	0,2	0,0016	148,59	9,99
Appui 14	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	0,31	0,3038	0,2	0,0016	91,15	6,13
Déviateur2	24,44	0,3038	0,2	0,0016	148,59	9,99
Appui 15	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	0,31	0,3038	0,2	0,0016	91,15	6,13
Déviateur2	24,44	0,3038	0,2	0,0016	148,59	9,99
Appui 16	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	0,31	0,3038	0,2	0,0016	91,15	6,13
Déviateur2	24,44	0,3038	0,2	0,0016	148,59	9,99
Appui 17	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	1,00	0,3038	0,2	0,0016	92,79	6,24
Déviateur2	26,50	0,3038	0,2	0,0016	153,50	10,32
Appui 18	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	1,00	0,3038	0,2	0,0016	92,79	6,24
Déviateur2	26,50	0,3038	0,2	0,0016	153,50	10,32
Appui 19	9,25	0,3038	0,2	0,0016	112,43	7,56
Déviateur1	16,75	0,3038	0,2	0,0016	130,29	8,76
Déviateur2	2,15	0,3038	0,2	0,0016	95,53	6,42
Appui 20	9,65	0,3038	0,2	0,0016	113,39	7,62
Déviateur1	17,15	0,3038	0,2	0,0016	131,24	8,82
Déviateur2	2,15	0,3038	0,2	0,0016	95,53	6,42
Appui 21	9,65	0,3038	0,2	0,0016	113,39	7,62
Déviateur1	17,15	0,3038	0,2	0,0016	131,24	8,82
Déviateur2	2,15	0,3038	0,2	0,0016	95,53	6,42
Appui 22	9,65	0,3038	0,2	0,0016	113,39	7,62
Déviateur1	17,15	0,3038	0,2	0,0016	131,24	8,82
Déviateur2	2,15	0,3038	0,2	0,0016	95,53	6,42
Appui 23	9,65	0,3038	0,2	0,0016	113,39	7,62
	21,60	0,3038	0,2	0,0016	141,84	9,53

Les pertes par recul d'ancrage

Section	X(m)	L(m)	a_{tot} (rd)	Ψ	λ	$\Delta\sigma_{encr}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{enc}$ (%)
Culée 1	0	19,5	0,300	0,0047	12,9662	180,47	6,74
Déviateur1	8,83333333					149,73	5,59
Déviateur2	19,875					0,00	0,00
Appui 1	26,5	17,5	0,300	0,0050	12,5046	160,94	6,01
Déviateur1	35,5					0,00	0,00
Déviateur2	53,5					0,00	0,00
Appui 2	62,5	30	0,300	0,0036	14,7788	136,91	5,11
Déviateur1	71,5					0,00	0,00
Déviateur2	89,5					143,76	5,37
Appui 3	98,5	31	0,300	0,0035	14,9131	120,08	4,48
Déviateur1	107,9375					0,00	0,00
Déviateur2	126,8125					127,15	4,75
Appui 4	136,25	31	0,300	0,0035	14,9131	0,00	0,00
Déviateur1	142,6875					0,00	0,00
Déviateur2	155,5625					138,94	5,19
Appui 5	162	25,75	0,300	0,0039	14,1446	0,00	0,00
Déviateur1	168,4375					0,00	0,00
Déviateur2	181,3125					138,94	5,19
Appui 6	187,75	25,75	0,300	0,0039	14,1446	0,00	0,00
Déviateur1	194,1875					0,00	0,00
Déviateur2	207,0625					137,08	5,12
Appui 7	213,5	27,25	0,300	0,0038	14,3812	0,00	0,00
Déviateur1	225,5625					161,83	6,04
Déviateur2	249,6875					0,00	0,00
Appui 8	261,75	21	0,300	0,0028	16,6289	140,72	5,25
Déviateur1	273,8125					161,83	6,04
Déviateur2	297,9375					0,00	0,00
Appui 9	310	21	0,300	0,0028	16,6289	140,72	5,25
Déviateur1	322,0625					161,83	6,04
Déviateur2	346,1875					0,00	0,00
Appui 10	358,25	21	0,300	0,0028	16,6289	140,72	5,25
Déviateur1	370,3125					161,83	6,04
Déviateur2	394,4375					0,00	0,00
Appui 11	406,5	21	0,300	0,0028	16,6289	140,72	5,25
Déviateur1	418,5625					161,83	6,04
Déviateur2	442,6875					0,00	0,00
Appui 12	454,75	21	0,300	0,0028	16,6289	140,72	5,25
Déviateur1	466,8125					161,83	6,04
Déviateur2	490,9375					0,00	0,00

Appui 13	503	21	0,300	0,0028	16,6289	140,72	5,25
Déviateur1	515,0625	27,25	0,300	0,0038	14,3812	161,83	6,04
Déviateur2	539,1875					0,00	0,00
Appui 14	551,25	21	0,300	0,0028	16,6289	140,72	5,25
Déviateur1	563,3125	27,25	0,300	0,0038	14,3812	161,83	6,04
Déviateur2	587,4375					0,00	0,00
Appui 15	599,5	21	0,300	0,0028	16,6289	140,72	5,25
Déviateur1	611,5625	27,25	0,300	0,0038	14,3812	161,83	6,04
Déviateur2	635,6875					0,00	0,00
Appui 16	647,75	21	0,300	0,0028	16,6289	140,72	5,25
Déviateur1	659,8125	27,25	0,300	0,0038	14,3812	161,83	6,04
Déviateur2	683,9375					0,00	0,00
Appui 17	696	21	0,300	0,0028	16,8285	139,05	5,19
Déviateur1	708,75	30	0,300	0,0036	14,7788	155,66	5,81
Déviateur2	734,25					0,00	0,00
Appui 18	747	21	0,300	0,0028	16,8285	139,05	5,19
Déviateur1	759,75	30	0,300	0,0036	14,7788	155,66	5,81
Déviateur2	785,25					0,00	0,00
Appui 19	798	29,6	0,300	0,0036	14,7237	133,97	5,00
Déviateur1	805,5					0,00	0,00
Déviateur2	820,5	30	0,300	0,0036	14,7788	152,58	5,70
Appui 20	828					132,49	4,95
Déviateur1	835,5					0,00	0,00
Déviateur2	850,5	30	0,300	0,0036	14,7788	152,58	5,70
Appui 21	858					132,49	4,95
Déviateur1	865,5					0,00	0,00
Déviateur2	880,5	30	0,300	0,0036	14,7788	152,58	5,70
Appui 22	888					132,49	4,95
Déviateur1	895,5					0,00	0,00
Déviateur2	910,5	21,6	0,300	0,0044	13,4018	167,60	6,26
Appui 23	918					143,17	5,35
	929,95					0,00	0,00

Perte par déformations instantanées du béton :

Section	$\Delta\sigma_{fro}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{rec}$ (Mpa)	M perm (Mpa)	P (kN)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{racc}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{racc}$ (%)
Culée 1	90,41	180,47	0,00	26289,78	7,08	16,83	0,63
Déviateur1	111,44	149,73	7959,76	17666,29	6,86	15,56	0,58
Déviateur2	137,73	0,00	-5316,60	19443,90	9,94	22,55	0,84
Appui 1	107,08	160,94	-15017,22	26351,59	8,68	20,63	0,77
Déviateur1	128,50	0,00	11020,22	19576,75	7,23	16,39	0,61
Déviateur2	129,69	0,00	1670,53	19559,61	8,81	19,98	0,75
Appui 2	109,46	136,91	-20579,76	26819,32	9,39	22,32	0,83
Déviateur1	130,88	0,00	6735,68	19542,46	7,94	18,01	0,67
Déviateur2	102,31	143,76	-2068,38	17883,76	8,67	19,65	0,73
Appui 3	123,74	120,08	-23813,93	26874,16	9,75	23,17	0,86
Déviateur1	146,21	0,00	8294,79	19321,76	7,57	17,18	0,64
Déviateur2	117,34	127,15	6092,06	17906,45	7,29	16,53	0,62
Appui 4	139,81	0,00	-18063,29	29120,85	9,75	23,16	0,86
Déviateur1	155,14	0,00	-244,21	19193,20	8,97	20,33	0,76
Déviateur2	111,99	138,94	-1330,16	17813,91	8,51	19,30	0,72
Appui 5	127,31	0,00	-9551,97	29390,83	8,92	21,20	0,79
Déviateur1	142,64	0,00	6665,91	19373,19	7,87	17,86	0,67
Déviateur2	111,99	138,94	3065,83	17813,91	7,76	17,60	0,66
Appui 6	127,31	0,00	-6840,29	29390,83	8,64	20,52	0,77
Déviateur1	142,64	0,00	1154,70	19373,19	8,81	19,98	0,75
Déviateur2	111,99	137,08	-14413,26	17840,66	10,75	24,37	0,91
Appui 7	127,31	0,00	-31778,04	29390,83	11,27	26,77	1,00
Déviateur1	91,15	161,83	12785,12	17784,24	6,10	13,82	0,52
Déviateur2	148,59	0,00	6818,84	19287,48	7,81	17,71	0,66
Appui 8	112,43	140,72	-46204,77	26672,71	12,06	28,65	1,07
Déviateur1	91,15	161,83	4534,87	17784,24	7,50	17,00	0,63
Déviateur2	148,59	0,00	5952,04	19287,48	7,96	18,04	0,67
Appui 9	112,43	140,72	-43031,94	26672,71	11,72	27,85	1,04
Déviateur1	91,15	161,83	6117,57	17784,24	7,23	16,39	0,61
Déviateur2	148,59	0,00	4120,05	19287,48	8,27	18,75	0,70
Appui 10	112,43	140,72	-44282,28	26672,71	11,86	28,16	1,05
Déviateur1	91,15	161,83	5082,90	17784,24	7,40	16,79	0,63
Déviateur2	148,59	0,00	4692,33	19287,48	8,17	18,53	0,69
Appui 11	112,43	140,72	-44348,80	26672,71	11,86	28,18	1,05
Déviateur1	91,15	161,83	4798,88	17784,24	7,45	16,90	0,63
Déviateur2	148,59	0,00	5595,02	19287,48	8,02	18,18	0,68
Appui 12	112,43	140,72	-44531,41	26672,71	11,88	28,23	1,05
Déviateur1	91,15	161,83	4447,74	17784,24	7,51	17,04	0,64
Déviateur2	148,59	0,00	4489,21	19287,48	8,20	18,61	0,69

Appui 13	112,43	140,72	-47541,66	26672,71	12,20	28,98	1,08
Déviateur1	91,15	161,83	6967,21	17784,24	7,08	16,07	0,60
Déviateur2	148,59	0,00	2485,23	19287,48	8,55	19,38	0,72
Appui 14	112,43	140,72	-44895,27	26672,71	11,92	28,32	1,06
Déviateur1	91,15	161,83	5947,96	17784,24	7,26	16,46	0,61
Déviateur2	148,59	0,00	2971,02	19287,48	8,46	19,19	0,72
Appui 15	112,43	140,72	-45209,07	26672,71	11,95	28,40	1,06
Déviateur1	91,15	161,83	5365,45	17784,24	7,36	16,68	0,62
Déviateur2	148,59	0,00	3993,02	19287,48	8,29	18,80	0,70
Appui 16	112,43	140,72	-44797,69	26672,71	11,91	28,29	1,06
Déviateur1	91,15	161,83	4805,46	17784,24	7,45	16,90	0,63
Déviateur2	148,59	0,00	3244,63	19287,48	8,42	19,09	0,71
Appui 17	112,43	139,05	-47306,92	26708,76	12,18	28,95	1,08
Déviateur1	92,79	155,66	7136,51	17849,55	7,09	16,07	0,60
Déviateur2	153,50	0,00	3126,76	19216,77	8,40	19,06	0,71
Appui 18	112,43	139,05	-54648,26	26708,76	12,96	30,78	1,15
Déviateur1	92,79	155,66	3545,26	17849,55	7,70	17,45	0,65
Déviateur2	153,50	0,00	12796,10	19216,77	6,76	15,33	0,57
Appui 19	112,43	133,97	-40134,46	26818,56	11,46	27,22	1,02
Déviateur1	130,29	0,00	-12390,55	19551,03	11,20	25,39	0,95
Déviateur2	95,53	152,58	246,20	17854,48	8,26	18,73	0,70
Appui 20	113,39	132,49	-14521,09	26829,93	8,76	20,81	0,78
Déviateur1	131,24	0,00	5096,39	19537,32	8,22	18,64	0,70
Déviateur2	95,53	152,58	1749,02	17854,48	8,00	18,15	0,68
Appui 21	113,39	132,49	-20392,87	26829,93	9,38	22,28	0,83
Déviateur1	131,24	0,00	1725,37	19537,32	8,79	19,94	0,74
Déviateur2	95,53	152,58	2788,87	17854,48	7,83	17,75	0,66
Appui 22	113,39	132,49	-17647,43	26829,93	9,09	21,59	0,81
Déviateur1	131,24	0,00	1218,97	19537,32	8,88	20,13	0,75
Déviateur2	95,53	167,60	-414,43	17638,13	8,27	18,76	0,70
Appui 23	113,39	143,17	-28718,02	26599,15	10,19	24,22	0,90

Les pertes instantanées

Section	X(m)	Perte par frottement (%)	Perte par recule d'encrage (%)	Perte par raccourcissement (%)	Perte instantanée totale (%)
Culée 1	0	6,08	6,74	0,63	13,44
Déviateur1	8,83333333	7,49	5,59	0,58	13,66
Déviateur2	19,875	9,26	0,00	0,84	10,10
Appui 1	26,5	7,20	6,01	0,77	13,98
Déviateur1	35,5	8,64	0,00	0,61	9,25
Déviateur2	53,5	8,72	0,00	0,75	9,46
Appui 2	62,5	7,36	5,11	0,83	13,30
Déviateur1	71,5	8,80	0,00	0,67	9,47
Déviateur2	89,5	6,88	5,37	0,73	12,98
Appui 3	98,5	8,32	4,48	0,86	13,66
Déviateur1	107,9375	9,83	0,00	0,64	10,47
Déviateur2	126,8125	7,89	4,75	0,62	13,25
Appui 4	136,25	9,40	0,00	0,86	10,26
Déviateur1	142,6875	10,43	0,00	0,76	11,19
Déviateur2	155,5625	7,53	5,19	0,72	13,43
Appui 5	162	8,56	0,00	0,79	9,35
Déviateur1	168,4375	9,59	0,00	0,67	10,25
Déviateur2	181,3125	7,53	5,19	0,66	13,37
Appui 6	187,75	8,56	0,00	0,77	9,32
Déviateur1	194,1875	9,59	0,00	0,75	10,33
Déviateur2	207,0625	7,53	5,12	0,91	13,55
Appui 7	213,5	8,56	0,00	1,00	9,56
Déviateur1	225,5625	6,13	6,04	0,52	12,68
Déviateur2	249,6875	9,99	0,00	0,66	10,65
Appui 8	261,75	7,56	5,25	1,07	13,88
Déviateur1	273,8125	6,13	6,04	0,63	12,80
Déviateur2	297,9375	9,99	0,00	0,67	10,66
Appui 9	310	7,56	5,25	1,04	13,85
Déviateur1	322,0625	6,13	6,04	0,61	12,78
Déviateur2	346,1875	9,99	0,00	0,70	10,69
Appui 10	358,25	7,56	5,25	1,05	13,86
Déviateur1	370,3125	6,13	6,04	0,63	12,79
Déviateur2	394,4375	9,99	0,00	0,69	10,68
Appui 11	406,5	7,56	5,25	1,05	13,86
Déviateur1	418,5625	6,13	6,04	0,63	12,80
Déviateur2	442,6875	9,99	0,00	0,68	10,66
Appui 12	454,75	7,56	5,25	1,05	13,86

Déviateur1	466,8125	6,13	6,04	0,64	12,80
Déviateur2	490,9375	9,99	0,00	0,69	10,68
Appui 13	503	7,56	5,25	1,08	13,89
Déviateur1	515,0625	6,13	6,04	0,60	12,77
Déviateur2	539,1875	9,99	0,00	0,72	10,71
Appui 14	551,25	7,56	5,25	1,06	13,87
Déviateur1	563,3125	6,13	6,04	0,61	12,78
Déviateur2	587,4375	9,99	0,00	0,72	10,70
Appui 15	599,5	7,56	5,25	1,06	13,87
Déviateur1	611,5625	6,13	6,04	0,62	12,79
Déviateur2	635,6875	9,99	0,00	0,70	10,69
Appui 16	647,75	7,56	5,25	1,06	13,87
Déviateur1	659,8125	6,13	6,04	0,63	12,80
Déviateur2	683,9375	9,99	0,00	0,71	10,70
Appui 17	696	7,56	5,19	1,08	13,83
Déviateur1	708,75	6,24	5,81	0,60	12,65
Déviateur2	734,25	10,32	0,00	0,71	11,03
Appui 18	747	7,56	5,19	1,15	13,90
Déviateur1	759,75	6,24	5,81	0,65	12,70
Déviateur2	785,25	10,32	0,00	0,57	10,89
Appui 19	798	7,56	5,00	1,02	13,57
Déviateur1	805,5	8,76	0,00	0,95	9,70
Déviateur2	820,5	6,42	5,70	0,70	12,82
Appui 20	828	7,62	4,95	0,78	13,34
Déviateur1	835,5	8,82	0,00	0,70	9,52
Déviateur2	850,5	6,42	5,70	0,68	12,79
Appui 21	858	7,62	4,95	0,83	13,40
Déviateur1	865,5	8,82	0,00	0,74	9,56
Déviateur2	880,5	6,42	5,70	0,66	12,78
Appui 22	888	7,62	4,95	0,81	13,37
Déviateur1	895,5	8,82	0,00	0,75	9,57
Déviateur2	910,5	6,42	6,26	0,70	13,38
Appui 23	918	7,62	5,35	0,90	13,87

Les pertes dues au fluage du béton de 14 à 28 jours

Section	Perte instant	P (kN)	M (kN.m)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{fu14}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu14}$ (%)
Culée 1	13,44	27820,38	0,00	7,49	7,63	0,51
Déviateur1	13,66	18500,11	7959,76	7,25	7,38	0,50
Déviateur2	10,10	19263,48	-5316,60	9,86	10,05	0,68
Appui 1	13,98	27649,11	-15017,22	9,03	9,20	0,62
Déviateur1	9,25	19445,60	11020,22	7,17	7,30	0,49
Déviateur2	9,46	19399,76	1670,53	8,74	8,90	0,60
Appui 2	13,30	27865,79	-20579,76	9,68	9,86	0,66
Déviateur1	9,47	19398,39	6735,68	7,87	8,02	0,54
Déviateur2	12,98	18646,57	-2068,38	9,02	9,19	0,62
Appui 3	13,66	27748,98	-23813,93	9,99	10,17	0,68
Déviateur1	10,47	19184,36	8294,79	7,51	7,65	0,51
Déviateur2	13,25	18587,97	6092,06	7,61	7,75	0,52
Appui 4	10,26	28842,90	-18063,29	9,67	9,86	0,66
Déviateur1	11,19	19030,55	-244,21	8,89	9,06	0,61
Déviateur2	13,43	18548,73	-1330,16	8,85	9,02	0,61
Appui 5	9,35	29136,40	-9551,97	8,86	9,02	0,61
Déviateur1	10,25	19230,33	6665,91	7,81	7,95	0,53
Déviateur2	13,37	18562,29	3065,83	8,11	8,26	0,56
Appui 6	9,32	29144,55	-6840,29	8,57	8,73	0,59
Déviateur1	10,33	19213,33	1154,70	8,74	8,90	0,60
Déviateur2	13,55	18523,01	-14413,26	11,06	11,27	0,76
Appui 7	9,56	29069,57	-31778,04	11,18	11,39	0,77
Déviateur1	12,68	18709,36	12785,12	6,53	6,65	0,45
Déviateur2	10,65	19145,81	6818,84	7,74	7,89	0,53
Appui 8	13,88	27679,86	-46204,77	12,33	12,56	0,84
Déviateur1	12,80	18683,91	4534,87	7,92	8,06	0,54
Déviateur2	10,66	19143,14	5952,04	7,89	8,04	0,54
Appui 9	13,85	27689,40	-43031,94	12,00	12,22	0,82
Déviateur1	12,78	18688,79	6117,57	7,65	7,79	0,52
Déviateur2	10,69	19137,49	4120,05	8,20	8,35	0,56
Appui 10	13,86	27685,64	-44282,28	12,13	12,36	0,83
Déviateur1	12,79	18685,60	5082,90	7,82	7,97	0,54
Déviateur2	10,68	19139,25	4692,33	8,10	8,25	0,55
Appui 11	13,86	27685,44	-44348,80	12,13	12,36	0,83
Déviateur1	12,80	18684,72	4798,88	7,87	8,02	0,54
Déviateur2	10,66	19142,04	5595,02	7,95	8,10	0,54
Appui 12	13,86	27684,89	-44531,41	12,15	12,38	0,83
Déviateur1	12,80	18683,64	4447,74	7,93	8,08	0,54

Déviateur2	10,68	19138,63	4489,21	8,14	8,29	0,56
Appui 13	13,89	27675,84	-47541,66	12,47	12,70	0,85
Déviateur1	12,77	18691,41	6967,21	7,51	7,65	0,51
Déviateur2	10,71	19132,45	2485,23	8,47	8,63	0,58
Appui 14	13,87	27683,79	-44895,27	12,19	12,42	0,83
Déviateur1	12,78	18688,27	5947,96	7,68	7,82	0,53
Déviateur2	10,70	19133,95	2971,02	8,39	8,55	0,57
Appui 15	13,87	27682,85	-45209,07	12,22	12,45	0,84
Déviateur1	12,79	18686,47	5365,45	7,78	7,92	0,53
Déviateur2	10,69	19137,10	3993,02	8,22	8,37	0,56
Appui 16	13,87	27684,09	-44797,69	12,18	12,41	0,83
Déviateur1	12,80	18684,74	4805,46	7,87	8,02	0,54
Déviateur2	10,70	19134,79	3244,63	8,35	8,50	0,57
Appui 17	13,83	27696,29	-47306,92	12,45	12,68	0,85
Déviateur1	12,65	18717,19	7136,51	7,49	7,63	0,51
Déviateur2	11,03	19064,31	3126,76	8,33	8,49	0,57
Appui 18	13,90	27674,22	-54648,26	13,22	13,47	0,90
Déviateur1	12,70	18706,12	3545,26	8,09	8,25	0,55
Déviateur2	10,89	19094,13	12796,10	6,70	6,83	0,46
Appui 19	13,57	27778,02	-40134,46	11,72	11,94	0,80
Déviateur1	9,70	19347,90	-12390,55	11,10	11,31	0,76
Déviateur2	12,82	18681,12	246,20	8,64	8,81	0,59
Appui 20	13,34	27852,11	-14521,09	9,03	9,20	0,62
Déviateur1	9,52	19388,23	5096,39	8,15	8,30	0,56
Déviateur2	12,79	18685,75	1749,02	8,39	8,55	0,57
Appui 21	13,40	27834,45	-20392,87	9,65	9,83	0,66
Déviateur1	9,56	19377,84	1725,37	8,72	8,88	0,60
Déviateur2	12,78	18688,96	2788,87	8,22	8,37	0,56
Appui 22	13,37	27842,71	-17647,43	9,36	9,54	0,64
Déviateur1	9,57	19376,28	1218,97	8,80	8,97	0,60
Déviateur2	13,38	18560,71	-414,43	8,70	8,86	0,60
Appui 23	13,87	27682,99	-28718,02	10,49	10,68	0,72

Les pertes dues au fluage du béton de 28 à ∞ jours

Section	Perte instant	P (kN)	M (kN.m)	σ_b (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu14}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{flu14}$ (%)
Culée 1	13,44	27655,47	0	7,45	56,28	3,78
Déviateur1	13,66	18393,77	7959,7643	7,20	54,39	3,65
Déviateur2	10,10	19118,83	-5316,6033	9,79	73,98	4,97
Appui 1	13,98	27450,36	-15017,2236	8,98	67,83	4,56
Déviateur1	9,25	19340,44	11020,2207	7,12	53,78	3,61
Déviateur2	9,46	19271,61	1670,527	8,68	65,55	4,40
Appui 2	13,30	27652,85	-20579,7648	9,62	72,67	4,88
Déviateur1	9,47	19282,87	6735,6783	7,82	59,08	3,97
Déviateur2	12,98	18514,23	-2068,375	8,96	67,69	4,55
Appui 3	13,66	27529,23	-23813,93	9,93	74,99	5,04
Déviateur1	10,47	19074,19	8294,7903	7,46	56,35	3,79
Déviateur2	13,25	18476,37	6092,0629	7,56	57,07	3,84
Appui 4	10,26	28630,00	-18063,2864	9,62	72,65	4,88
Déviateur1	11,19	18900,13	-244,2124	8,83	66,70	4,48
Déviateur2	13,43	18418,90	-1330,157	8,79	66,40	4,46
Appui 5	9,35	28941,51	-9551,9747	8,80	66,51	4,47
Déviateur1	10,25	19115,78	6665,9119	7,75	58,58	3,94
Déviateur2	13,37	18443,32	3065,8311	8,05	60,84	4,09
Appui 6	9,32	28955,91	-6840,2908	8,52	64,38	4,33
Déviateur1	10,33	19085,16	1154,7049	8,68	65,55	4,41
Déviateur2	13,55	18360,72	-14413,2628	10,99	83,00	5,58
Appui 7	9,56	28823,51	-31778,0371	11,12	83,97	5,64
Déviateur1	12,68	18613,62	12785,1208	6,48	48,96	3,29
Déviateur2	10,65	19032,23	6818,8399	7,69	58,09	3,90
Appui 8	13,88	27408,55	-46204,7691	12,26	92,59	6,22
Déviateur1	12,80	18567,78	4534,8674	7,86	59,40	3,99
Déviateur2	10,66	19027,41	5952,04055	7,84	59,19	3,98
Appui 9	13,85	27425,40	-43031,9449	11,93	90,09	6,05
Déviateur1	12,78	18576,57	6117,5669	7,60	57,39	3,86
Déviateur2	10,69	19017,23	4120,0481	8,14	61,51	4,13
Appui 10	13,86	27418,76	-44282,2833	12,06	91,08	6,12
Déviateur1	12,79	18570,82	5082,89875	7,77	58,70	3,95
Déviateur2	10,68	19020,41	4692,33455	8,05	60,78	4,08
Appui 11	13,86	27418,41	-44348,7964	12,06	91,13	6,12
Déviateur1	12,80	18569,25	4798,8816	7,82	59,06	3,97
Déviateur2	10,66	19025,43	5595,0196	7,89	59,64	4,01
Appui 12	13,86	27417,44	-44531,4078	12,08	91,27	6,13
Déviateur1	12,80	18567,29	4447,7383	7,88	59,51	4,00

Déviateur2	10,68	19019,28	4489,2105	8,08	61,04	4,10
Appui 13	13,89	27401,46	-47541,6593	12,40	93,64	6,29
Déviateur1	12,77	18581,29	6967,2071	7,46	56,32	3,78
Déviateur2	10,71	19008,14	2485,2312	8,42	63,57	4,27
Appui 14	13,87	27415,51	-44895,2673	12,12	91,56	6,15
Déviateur1	12,78	18575,63	5947,95975	7,63	57,61	3,87
Déviateur2	10,70	19010,84	2971,0193	8,33	62,96	4,23
Appui 15	13,87	27413,84	-45209,0705	12,15	91,80	6,17
Déviateur1	12,79	18572,39	5365,45165	7,72	58,34	3,92
Déviateur2	10,69	19016,52	3993,0174	8,16	61,67	4,14
Appui 16	13,87	27416,03	-44797,689	12,11	91,48	6,15
Déviateur1	12,80	18569,28	4805,4581	7,82	59,05	3,97
Déviateur2	10,70	19012,36	3244,6288	8,29	62,61	4,21
Appui 17	13,83	27422,34	-47306,9178	12,38	93,49	6,28
Déviateur1	12,65	18607,32	7136,5146	7,44	56,19	3,78
Déviateur2	11,03	18942,07	3126,76135	8,28	62,52	4,20
Appui 18	13,90	27383,36	-54648,2614	13,14	99,26	6,67
Déviateur1	12,70	18587,37	3545,2602	8,04	60,74	4,08
Déviateur2	10,89	18995,81	12796,1045	6,66	50,29	3,38
Appui 19	13,57	27520,22	-40134,4576	11,65	87,98	5,91
Déviateur1	9,70	19185,03	-12390,5522	11,03	83,30	5,60
Déviateur2	12,82	18554,31	246,1983	8,59	64,86	4,36
Appui 20	13,34	27653,31	-14521,0875	8,98	67,84	4,56
Déviateur1	9,52	19268,70	5096,3877	8,09	61,14	4,11
Déviateur2	12,79	18562,66	1749,0231	8,33	62,96	4,23
Appui 21	13,40	27622,13	-20392,8746	9,59	72,46	4,87
Déviateur1	9,56	19249,97	1725,3667	8,66	65,40	4,40
Déviateur2	12,78	18568,44	2788,8662	8,16	61,64	4,14
Appui 22	13,37	27636,71	-17647,4326	9,31	70,30	4,72
Déviateur1	9,57	19247,15	1218,968	8,74	66,04	4,44
Déviateur2	13,38	18433,08	-414,4338	8,64	65,28	4,39
Appui 23	13,87	27452,24	-28718,0189	10,42	78,74	5,29

Les pertes dues à la Relaxation des aciers :

Section	X(m)	σ_{bi} (Mpa)	$\Delta\sigma_{rel}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{rel}$ (%)
Culée 1	0	1287,98	52,74	3,54
Déviateur1	8,833333333	1284,73	52,31	3,52
Déviateur2	19,875	1337,74	59,56	4,00
Appui 1	26,5	1280,05	51,69	3,47
Déviateur1	35,5	1350,39	61,35	4,12
Déviateur2	53,5	1347,21	60,90	4,09
Appui 2	62,5	1290,08	53,02	3,56
Déviateur1	71,5	1347,11	60,89	4,09
Déviateur2	89,5	1294,90	53,67	3,61
Appui 3	98,5	1284,67	52,30	3,51
Déviateur1	107,9375	1332,25	58,79	3,95
Déviateur2	126,8125	1290,83	53,12	3,57
Appui 4	136,25	1335,32	59,22	3,98
Déviateur1	142,6875	1321,57	57,31	3,85
Déviateur2	155,5625	1288,11	52,76	3,55
Appui 5	162	1348,91	61,14	4,11
Déviateur1	168,4375	1335,44	59,24	3,98
Déviateur2	181,3125	1289,05	52,88	3,55
Appui 6	187,75	1349,28	61,20	4,11
Déviateur1	194,1875	1334,26	59,07	3,97
Déviateur2	207,0625	1286,32	52,52	3,53
Appui 7	213,5	1345,81	60,70	4,08
Déviateur1	225,5625	1299,26	54,26	3,65
Déviateur2	249,6875	1329,57	58,42	3,93
Appui 8	261,75	1281,47	51,88	3,49
Déviateur1	273,8125	1297,49	54,02	3,63
Déviateur2	297,9375	1329,38	58,39	3,92
Appui 9	310	1281,92	51,94	3,49
Déviateur1	322,0625	1297,83	54,06	3,63
Déviateur2	346,1875	1328,99	58,34	3,92
Appui 10	358,25	1281,74	51,91	3,49
Déviateur1	370,3125	1297,61	54,03	3,63
Déviateur2	394,4375	1329,11	58,36	3,92
Appui 11	406,5	1281,73	51,91	3,49
Déviateur1	418,5625	1297,55	54,03	3,63
Déviateur2	442,6875	1329,31	58,38	3,92
Appui 12	454,75	1281,71	51,91	3,49
Déviateur1	466,8125	1297,48	54,02	3,63
Déviateur2	490,9375	1329,07	58,35	3,92
Appui 13	503	1281,29	51,85	3,48
Déviateur1	515,0625	1298,01	54,09	3,64

Déviateur2	539,1875	1328,64	58,29	3,92
Appui 14	551,25	1281,66	51,90	3,49
Déviateur1	563,3125	1297,80	54,06	3,63
Déviateur2	587,4375	1328,75	58,30	3,92
Appui 15	599,5	1281,61	51,90	3,49
Déviateur1	611,5625	1297,67	54,04	3,63
Déviateur2	635,6875	1328,97	58,33	3,92
Appui 16	647,75	1281,67	51,90	3,49
Déviateur1	659,8125	1297,55	54,03	3,63
Déviateur2	683,9375	1328,80	58,31	3,92
Appui 17	696	1282,24	51,98	3,49
Déviateur1	708,75	1299,81	54,33	3,65
Déviateur2	734,25	1323,91	57,63	3,87
Appui 18	747	1281,21	51,84	3,48
Déviateur1	759,75	1299,04	54,23	3,64
Déviateur2	785,25	1325,98	57,92	3,89
Appui 19	798	1286,02	52,48	3,53
Déviateur1	805,5	1343,60	60,39	4,06
Déviateur2	820,5	1297,30	53,99	3,63
Appui 20	828	1289,45	52,94	3,56
Déviateur1	835,5	1346,41	60,79	4,09
Déviateur2	850,5	1297,62	54,04	3,63
Appui 21	858	1288,63	52,83	3,55
Déviateur1	865,5	1345,68	60,68	4,08
Déviateur2	880,5	1297,84	54,07	3,63
Appui 22	888	1289,01	52,88	3,55
Déviateur1	895,5	1345,57	60,67	4,08
Déviateur2	910,5	1288,94	52,87	3,55
Appui 23	918	1281,62	51,90	3,49

Les pertes totales des câbles de poussage

Section	X(m)	$\Delta\sigma_{pi}\%$	$\Delta\sigma_{ret}\%$	$\Delta\sigma_{flu}\%$	$5/6\Delta\sigma_{rel}\%$	$\Delta\sigma_{pd}\%$	Perte totale %
Culée 1	0	13,44	1,09	3,78	2,95	7,83	21,27
Déviateur1	8,83333333	13,66	1,09	3,65	2,93	7,68	21,34
Déviateur2	19,875	10,10	1,09	4,97	3,34	9,40	19,50
Appui 1	26,5	13,98	1,09	4,56	2,89	8,55	22,52
Déviateur1	35,5	9,25	1,09	3,61	3,44	8,14	17,39
Déviateur2	53,5	9,46	1,09	4,40	3,41	8,91	18,37
Appui 2	62,5	13,30	1,09	4,88	2,97	8,95	22,25
Déviateur1	71,5	9,47	1,09	3,97	3,41	8,47	17,94
Déviateur2	89,5	12,98	1,09	4,55	3,01	8,65	21,62
Appui 3	98,5	13,66	1,09	5,04	2,93	9,06	22,73
Déviateur1	107,9375	10,47	1,09	3,79	3,29	8,17	18,64
Déviateur2	126,8125	13,25	1,09	3,84	2,98	7,90	21,15
Appui 4	136,25	10,26	1,09	4,88	3,32	9,29	19,55
Déviateur1	142,6875	11,19	1,09	4,48	3,21	8,78	19,97
Déviateur2	155,5625	13,43	1,09	4,46	2,95	8,51	21,94
Appui 5	162	9,35	1,09	4,47	3,42	8,99	18,33
Déviateur1	168,4375	10,25	1,09	3,94	3,32	8,35	18,60
Déviateur2	181,3125	13,37	1,09	4,09	2,96	8,14	21,51
Appui 6	187,75	9,32	1,09	4,33	3,43	8,85	18,17
Déviateur1	194,1875	10,33	1,09	4,41	3,31	8,81	19,14
Déviateur2	207,0625	13,55	1,09	5,58	2,94	9,61	23,17
Appui 7	213,5	9,56	1,09	5,64	3,40	10,14	19,69
Déviateur1	225,5625	12,68	1,09	3,29	3,04	7,42	20,11
Déviateur2	249,6875	10,65	1,09	3,90	3,27	8,27	18,92
Appui 8	261,75	13,88	1,09	6,22	2,91	10,22	24,10
Déviateur1	273,8125	12,80	1,09	3,99	3,03	8,11	20,91
Déviateur2	297,9375	10,66	1,09	3,98	3,27	8,34	19,00
Appui 9	310	13,85	1,09	6,05	2,91	10,06	23,91
Déviateur1	322,0625	12,78	1,09	3,86	3,03	7,98	20,76
Déviateur2	346,1875	10,69	1,09	4,13	3,27	8,49	19,18
Appui 10	358,25	13,86	1,09	6,12	2,91	10,12	23,98
Déviateur1	370,3125	12,79	1,09	3,95	3,03	8,06	20,86
Déviateur2	394,4375	10,68	1,09	4,08	3,27	8,45	19,12
Appui 11	406,5	13,86	1,09	6,12	2,91	10,12	23,99
Déviateur1	418,5625	12,80	1,09	3,97	3,03	8,09	20,89
Déviateur2	442,6875	10,66	1,09	4,01	3,27	8,37	19,03
Appui 12	454,75	13,86	1,09	6,13	2,91	10,13	24,00
Déviateur1	466,8125	12,80	1,09	4,00	3,03	8,12	20,92
Déviateur2	490,9375	10,68	1,09	4,10	3,27	8,46	19,14
Appui 13	503	13,89	1,09	6,29	2,90	10,29	24,18

Déviateur1	515,0625	12,77	1,09	3,78	3,03	7,91	20,67
Déviateur2	539,1875	10,71	1,09	4,27	3,26	8,63	19,34
Appui 14	551,25	13,87	1,09	6,15	2,91	10,15	24,02
Déviateur1	563,3125	12,78	1,09	3,87	3,03	7,99	20,77
Déviateur2	587,4375	10,70	1,09	4,23	3,27	8,59	19,29
Appui 15	599,5	13,87	1,09	6,17	2,91	10,17	24,04
Déviateur1	611,5625	12,79	1,09	3,92	3,03	8,04	20,83
Déviateur2	635,6875	10,69	1,09	4,14	3,27	8,50	19,19
Appui 16	647,75	13,87	1,09	6,15	2,91	10,15	24,01
Déviateur1	659,8125	12,80	1,09	3,97	3,03	8,09	20,89
Déviateur2	683,9375	10,70	1,09	4,21	3,27	8,57	19,26
Appui 17	696	13,83	1,09	6,28	2,91	10,29	24,11
Déviateur1	708,75	12,65	1,09	3,78	3,04	7,91	20,56
Déviateur2	734,25	11,03	1,09	4,20	3,23	8,52	19,55
Appui 18	747	13,90	1,09	6,67	2,90	10,67	24,56
Déviateur1	759,75	12,70	1,09	4,08	3,04	8,21	20,91
Déviateur2	785,25	10,89	1,09	3,38	3,24	7,72	18,60
Appui 19	798	13,57	1,09	5,91	2,94	9,94	23,52
Déviateur1	805,5	9,70	1,09	5,60	3,38	10,07	19,78
Déviateur2	820,5	12,82	1,09	4,36	3,02	8,47	21,29
Appui 20	828	13,34	1,09	4,56	2,96	8,62	21,96
Déviateur1	835,5	9,52	1,09	4,11	3,40	8,60	18,12
Déviateur2	850,5	12,79	1,09	4,23	3,03	8,35	21,14
Appui 21	858	13,40	1,09	4,87	2,96	8,92	22,32
Déviateur1	865,5	9,56	1,09	4,40	3,40	8,89	18,45
Déviateur2	880,5	12,78	1,09	4,14	3,03	8,26	21,04
Appui 22	888	13,37	1,09	4,72	2,96	8,78	22,15
Déviateur1	895,5	9,57	1,09	4,44	3,40	8,93	18,50
Déviateur2	910,5	13,38	1,09	4,39	2,96	8,44	21,82
Appui 23	918	13,87	1,09	5,29	2,91	9,29	23,16

Annexe C

Calcul de ferrailage de l'hourdis supérieur

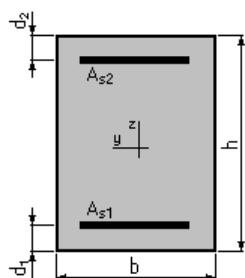
1. Hypothèses :

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 :



$$b = 100,0 \text{ (cm)}$$

$$h = 30,0 \text{ (cm)}$$

$$d_1 = 4,25 \text{ (cm)}$$

$$d_2 = 4,25 \text{ (cm)}$$

3. Armatures :

Section théorique $A_{s1} = 11,7$ (cm²)

Section minimum $A_{s \min} = 3,9$ (cm²)

théorique $\rho = 1,26$ (%)

minimum $\rho_{\min} = 0,15$ (%)

Section théorique $A_{s2} = 20,7$ (cm²)

Moments limites :

	$M_{\max}$ (kN*m)	$M_{\min}$ (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	127,44	-213,24
Etat Limite de Service	53,51	-92,81

Analyse par Etat:

Etat ELU $M_{\max} = 127,44$ (kN*m) $M_{\min} = -213,24$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1,00 Pivote: A

Position de l'axe neutre: $y = 4,7$ (cm)

Bras de levier: $Z = 23,8$ (cm)

Déformation du béton: $\epsilon_b = 2,24$ (‰)

Déformation de l'acier: $\epsilon_s = 10,00$ (‰)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 434,8$ (MPa)

comprimée: $\sigma'_s = 39,1$ (MPa)

Etat ELS $M_{\max} = 53,51$ (kN*m) $M_{\min} = -92,81$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1,00

Position de l'axe neutre: $y = 9,2$ (cm)

Bras de levier: $Z = 22,6$ (cm)
 Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 7,5$ (MPa)
 Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24,0$ (MPa)
 Contrainte de l'acier:
 tendue: $\sigma_s = 200,0$ (MPa)
 comprimée: $\sigma_s' = 59,7$ (MPa)
 Contrainte limite de l'acier: $\sigma_{s \text{ lim}} = 200,0$ (MPa)

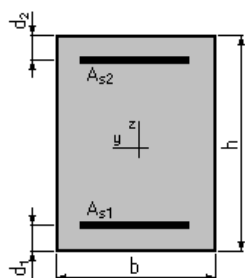
Calcul de ferrailage de l'hourdis inferieure

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 :



$b = 100,0$ (cm)
 $h = 30,0$ (cm)
 $d_1 = 4,25$ (cm)
 $d_2 = 4,25$ (cm)

3. Moments appliqués :

	$M_{\max}$ (kN*m)	$M_{\min}$ (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	21,90	-43,00
Etat Limite de Service	57,00	-113,40

4. Résultats :

Sections d'Acier:

Section théorique	$A_{s1} = 12,5$ (cm ²)	Section théorique	$A_{s2} = 25,9$ (cm ²)
Section minimum	$A_{s \text{ min}} = 3,9$ (cm ²)		
théorique	$\rho = 1,50$ (%)		
minimum	$\rho_{\min} = 0,15$ (%)		

Analyse par Cas:

Cas ELU	$M_{\max} = 21,90$	(kN*m)	$M_{\min} = -43,00$	(kN*m)
Coefficient de sécurité:	6,10	Pivot: A		
Position de l'axe neutre:	$y = 5,4$	(cm)		
Bras de levier:	$Z = 23,5$	(cm)		

Déformation du béton: $\varepsilon_b = 2,69$ (‰)
 Déformation de l'acier: $\varepsilon_s = 10,00$ (‰)
 Contrainte de l'acier:
 tendue: $\sigma_s = 434,8$ (MPa)
 comprimée: $\sigma'_s = 112,6$ (MPa)

Cas ELS $M_{\max} = 57,00$ (kN*m) $M_{\min} = -113,40$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1,00
 Position de l'axe neutre: $y = 10,0$ (cm)
 Bras de levier: $Z = 22,4$ (cm)
 Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 8,4$ (MPa)
 Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24,0$ (MPa)
 Contrainte de l'acier:
 tendue: $\sigma_s = 197,1$ (MPa)
 comprimée: $\sigma'_s = 71,9$ (MPa)
 Contrainte limite de l'acier: $\sigma_{s \text{ lim}} = 200,0$ (MPa)

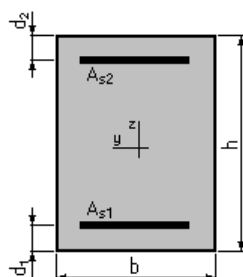
Calcul de ferrailage du porte-à-faux

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 :



$b = 100,0$ (cm)
 $h = 30,0$ (cm)
 $d_1 = 4,25$ (cm)
 $d_2 = 4,25$ (cm)

3. Moments appliqués :

	$M_{\max}$ (kN*m)	$M_{\min}$ (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	0,00	-210,00
Etat Limite de Service	0,00	-149,00

4. Résultats :

Sections d'Acier :

Section théorique	$A_{s1} = 0,0$ (cm ²)	Section théorique	$A_{s2} = 34,3$ (cm ²)
Section minimum	$A_{s \text{ min}} = 0,0$ (cm ²)		
théorique	$\rho = 1,33$ (%)		

minimum $\rho_{\min} = 0,15 \text{ (\%)}$

Analyse par Cas:

Cas ELU $M_{\max} = 0,00 \text{ (kN*m)}$ $M_{\min} = -210,00 \text{ (kN*m)}$

Coefficient de sécurité: 1,59 Pivot: B

Position de l'axe neutre: $y = 8,2 \text{ (cm)}$

Bras de levier: $Z = 22,4 \text{ (cm)}$

Déformation du béton: $\varepsilon_b = 3,50 \text{ (‰)}$

Déformation de l'acier: $\varepsilon_s = 7,44 \text{ (‰)}$

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 434,8 \text{ (MPa)}$

Cas ELS $M_{\max} = 0,00 \text{ (kN*m)}$ $M_{\min} = -149,00 \text{ (kN*m)}$

Coefficient de sécurité: 1,00

Position de l'axe neutre: $y = 11,9 \text{ (cm)}$

Bras de levier: $Z = 21,7 \text{ (cm)}$

Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 11,5 \text{ (MPa)}$

Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24,0 \text{ (MPa)}$

Contrainte de l'acier tendue: $\sigma_s = 200,0 \text{ (MPa)}$

Contrainte limite de l'acier: $\sigma_{s \text{ lim}} = 200,0 \text{ (MPa)}$

Calcul de ferrailage des Ames

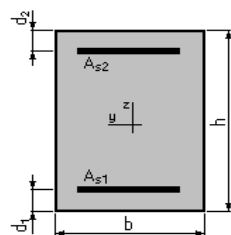
1. Hypothèses :

Béton : $f_{c28} = 40,0 \text{ (MPa)}$

Acier : $f_e = 500,0 \text{ (MPa)}$

- Fissuration très préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul en poteau
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99

2. Section:



$b = 100,0 \text{ (cm)}$

$h = 50,0 \text{ (cm)}$

$d_1 = 4,25 \text{ (cm)}$

$d_2 = 4,25 \text{ (cm)}$

3. Efforts appliqués :

Cas N°	Type	N (kN)	M (kN*m)
1.	ELU	684,00	-77,10
2.	ELS	488,10	-33,30

4. Résultats :

Sections d'Acier :

Section théorique	$A_{s1} = 6,0 \text{ (cm}^2\text{)}$	Section théorique	$A_{s2} = 6,0 \text{ (cm}^2\text{)}$
Section minimum	$A_{s \text{ min}} = 6,31 \text{ (cm}^2\text{)}$	Section maximum	$A_{s \text{ max}} = 250,0 \text{ (cm}^2\text{)}$
théorique	$\rho = 0,24 \text{ (\%)} $		
minimum	$\rho_{\text{min}} = 0,24 \text{ (\%)} $	maximum	$\rho_{\text{max}} = 5,00 \text{ (\%)} $

Analyse par Cas:

Cas N° 1: Type ELU N = 684,00 (kN) M = -77,10 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 9,91 Pivot: B
 Position de l'axe neutre: $y = 36,5 \text{ (cm)}$
 Bras de levier: $Z = 31,1 \text{ (cm)}$
 Déformation de l'acier: $\varepsilon_s = 0,88 \text{ (\%)}$
 Déformation du béton: $\varepsilon_b = 3,50 \text{ (\%)}$
 Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 176,6 \text{ (MPa)}$ comprimée: $\sigma_s' = 434,8 \text{ (MPa)}$

Cas N° 2: Type ELS N = 488,10 (kN) M = -33,30 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 14,23
 Position de l'axe neutre: $y = 56,7 \text{ (cm)}$
 Bras de levier: $Z = 27,3 \text{ (cm)}$
 Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 1,7 \text{ (MPa)}$
 Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24,0 \text{ (MPa)}$

Contrainte de l'acier comprimée $\sigma_s' = 23,4 \text{ (MPa)}$
 Contrainte limite de l'acier: $\sigma_{s \text{ lim}} = 200,0 \text{ (MPa)}$

Annexe D

Effort agissant sur les piles

Tableau des efforts agissant sur les piles creuses a l'ELU fondamental

Appuis	Max/ Min	N (kN)	H _{long}	H _{tras}	M _{torsion}	M _x	M _y
Culée 1	Max	2265.67	-7.381	-365.798	-2.26E-16	183.8022	-3.6905
Culée 1	Min	1486.251	-7.68	-367.604	-2.35E-16	182.8988	-3.8402
Culée 1	Max	2267.701	-2.862	-363.792	-8.76E-17	182.796	-1.4312
Culée 1	Min	1489.839	-3.181	-365.592	-9.74E-17	181.8962	-1.5906
Culée 2	Max	3298.994	3.842	387.867	3.59E-15	-191.6571	1.9212
Culée 2	Min	2428.344	3.45	383.314	3.54E-15	-193.9336	1.7251
Culée 2	Max	3308.598	9.525	390.793	3.77E-15	-193.0956	4.7624
Culée 2	Min	2509.441	9.142	386.191	3.74E-15	-195.3963	4.5711
Pile 1	Max	23485.196	665.312	-32.617	4.3629	582.2557	10644.9874
Pile 1	Min	20301.956	660.597	-32.722	4.3297	500.3326	10569.0359
Pile 2	Max	24147.032	626.114	-60.642	4.0569	1092.668	10014.1932
Pile 2	Min	20802.629	620.636	-60.847	4.0114	1001.0492	9927.3042
Pile 3	Max	24856.122	578.47	-85.046	3.7692	1516.1493	9247.3749
Pile 3	Min	21443.235	572.352	-85.404	3.7036	1423.3241	9151.9664
Pile 4	Max	22750.143	541.508	-109.535	3.8127	1937.5717	8649.5701
Pile 4	Min	19712.2	537.5	-109.863	3.7577	1852.3201	8588.7152
Pile 5	Max	19546.184	500.859	-125.874	4.3405	2238.1213	7991.918
Pile 5	Min	16970.558	498.597	-126.08	4.2647	2155.3775	7960.6115
Pile 6	Max	18423.947	474.715	-146.198	4.9715	2613.3332	7565.0226
Pile 6	Min	15664.928	472.962	-146.399	4.9	2520.6291	7541.1894
Pile 7	Max	25753.708	426.84	-165.519	5.4333	2917.4459	6797.0214
Pile 7	Min	21926.185	421.087	-166.383	5.3424	2830.4469	6701.7002
Pile 8	Max	29875.362	388.995	-206.788	4.6768	3666.8391	6169.8952
Pile 8	Min	25314.351	376.494	-208.958	4.5585	3545.4296	5979.1676
Pile 9	Max	29245.945	325.909	-232.773	3.4388	4178.8698	5130.1059
Pile 9	Min	24601.996	314.306	-235.145	3.3018	4040.4361	4960.4994
Pile 10	Max	29416.114	270.838	-247.499	2.5	4441.8705	4230.9217
Pile 10	Min	24809.338	259.322	-250.213	2.3452	4286.7486	4068.2652
Pile 11	Max	29374.334	216.31	-253.218	1.9115	4570.1495	3335.536
Pile 11	Min	24768.071	204.876	-256.302	1.7448	4394.508	3178.5244
Pile 12	Max	29383.573	163.537	-253.326	1.5769	4597.6323	2468.8109
Pile 12	Min	24778.155	152.197	-256.774	1.3957	4408.9514	2319.9605
Pile 13	Max	29382.046	111.964	-249.494	1.3606	4559.3332	1620.401
Pile 13	Min	24777.682	100.732	-253.293	1.1733	4354.5934	1479.9956
Pile 14	Max	29374.918	61.144	-242.456	1.208	4458.0118	787.2355
Pile 14	Min	24771.318	50.034	-246.606	1.0063	4244.6046	652.9276
Pile 15	Max	29402.995	11.418	-232.547	1.0213	4309.3566	-29.8407
Pile 15	Min	24798.242	0.453	-237.039	0.8192	4082.2932	-155.3665
Pile 16	Max	29300.123	-36.326	-219.298	0.6587	4102.9166	-814.4671
Pile 16	Min	24656.544	-46.917	-224.037	0.4322	3866.4394	-925.5124
Pile 17	Max	29840.509	-83.908	-197.421	-0.2385	3763.7968	-1586.2284

Pile 17	Min	25031.205	-95.426	-203.008	-0.4705	3502.1517	-1708.19
Pile 18	Max	31155.488	-124.479	-160.869	-2.0968	3155.6385	-2239.7889
Pile 18	Min	26351.128	-137.808	-167.886	-2.3609	2859.5965	-2371.5361
Pile 19	Max	26950.89	-140.208	-118.573	-3.8669	2371.8459	-2433.1181
Pile 19	Min	22857.957	-146.699	-122.081	-4.1711	2122.4972	-2518.3868
Pile 20	Max	20150.332	-173.333	-73.061	-3.8843	1603.0255	-2944.1169
Pile 20	Min	17078.823	-175.571	-74.218	-4.1656	1392.7353	-3043.0899
Pile 21	Max	22277.588	-183.465	-37.919	-3.8167	995.779	-3097.7163
Pile 21	Min	19643.592	-186.963	-40.004	-4.1346	777.8076	-3180.1271
Pile 22	Max	19943.288	-192.901	-2.882	-4.2296	444.7814	-3253.8046
Pile 22	Min	16792.344	-195.131	-4.263	-4.5379	246.648	-3351.4234
Pile 23	Max	27455.988	-219.025	53.191	-4.9062	-317.9452	-3720.1179
Pile 23	Min	23568.629	-225.818	48.408	-5.2364	-575.7394	-3911.6073
Pile 24	Max	28744.187	-200.76	107.697	-5.3635	-1479.1804	-3269.574
Pile 24	Min	24543.178	-209.24	101.786	-5.6261	-1786.1786	-3360.4707
Pile 25	Max	24466.375	-225.253	174.389	-5.3957	-2638.9603	-3587.5186
Pile 25	Min	20729.607	-230.954	170.576	-5.7135	-2920.5405	-3676.6111
Pile 26	Max	24713.329	-223.846	227.991	-5.9478	-3575.0388	-3501.7224
Pile 26	Min	21044.508	-229.553	224.216	-6.3153	-3864.3687	-3592.4109
Pile 27	Max	28120.483	-241.722	300.846	-5.699	-4792.1608	-3780.0342
Pile 27	Min	23773.718	-250.163	295.149	-6.0069	-5059.3124	-3870.423
Pile 28	Max	30952.34	-248.018	357.465	-1.6905	-5731.0731	-3869.5833
Pile 28	Min	26090.548	-261.386	349.349	-1.9826	-6059.7534	-3974.994
Pile 29	Max	30384.569	-300.753	386.802	2.3226	-6292.8089	-4671.3957
Pile 29	Min	25460.425	-313.362	379.875	2.0121	-6578.1245	-4799.0378
Pile 30	Max	30793.297	-367.438	384.643	4.7325	-6317.5005	-5727.7713
Pile 30	Min	25913.905	-381.043	377.77	4.4739	-6597.9829	-5870.2265
Pile 31	Max	26286.3	-450.316	363.369	5.847	-4703.3229	-5826.6384
Pile 31	Min	21667.751	-461.974	358.321	5.5835	-4902.012	-5930.7624
Pile 32	Max	24704.027	-530.723	340.371	6.2152	-4456.0824	-6856.3217
Pile 32	Min	20373.739	-540.266	336.724	6.0037	-4632.2756	-6939.5528
Pile 33	Max	24843.113	-594.593	307.623	6.4214	-3880.655	-7469.0648
Pile 33	Min	20616.987	-605.561	303.843	6.1944	-4030.5913	-7574.3097
Pile 34	Max	25781.513	-673.043	275.288	6.6585	-3455.4201	-8778.2199
Pile 34	Min	21515.234	-679.942	273.076	6.4861	-3548.8485	-8868.8601

Tableau des efforts agissant sur les piles pleines à L'ELS rare :

Appuis	Max/ Min	N (kN)	H _{long}	H _{tras}	M _{torsion}	M _x	M _y
Culée 1	Max	1638.83	-4.95	-243.429	-1.52E-16	122.3373	-2.475
Culée 1	Min	1101.299	-5.157	-244.675	-1.58E-16	121.7143	-2.5783
Culée 1	Max	1639.432	-1.86	-242.094	-5.69E-17	121.6674	-0.93
Culée 1	Min	1102.976	-2.08	-243.335	-6.37E-17	121.0468	-1.04
Culée 2	Max	2395.824	2.47	257.515	2.38E-15	-127.1874	1.2348
Culée 2	Min	1795.376	2.199	254.375	2.34E-15	-128.7574	1.0996
Culée 2	Max	2409.009	6.41	259.448	2.50E-15	-128.1374	3.205
Culée 2	Min	1857.866	6.146	256.275	2.48E-15	-129.7241	3.0731
Pile 1	Max	17211.894	443.193	-21.719	2.9086	386.5082	7091.1336
Pile 1	Min	15016.556	439.941	-21.791	2.8856	330.0095	7038.7533
Pile 2	Max	17691.177	417.353	-40.393	2.7042	729.1785	6675.2158
Pile 2	Min	15384.692	413.575	-40.534	2.6728	665.9931	6615.2923
Pile 3	Max	18209.337	385.321	-56.636	2.5128	1011.4415	6159.6424
Pile 3	Min	15855.621	381.102	-56.883	2.4675	947.4241	6093.8434
Pile 4	Max	16675.514	361.298	-73.008	2.5407	1293.3678	5770.9379
Pile 4	Min	14580.381	358.533	-73.234	2.5028	1234.5736	5728.969
Pile 5	Max	14338.063	333.614	-83.84	2.8933	1493.8379	5323.0111
Pile 5	Min	12561.769	332.054	-83.982	2.841	1436.7732	5301.4204
Pile 6	Max	13511.983	316.544	-97.42	3.3129	1745.5858	5044.0092
Pile 6	Min	11609.211	315.335	-97.559	3.2636	1681.6519	5027.5724
Pile 7	Max	18856.257	283.483	-110.114	3.6211	1942.5524	4514.073
Pile 7	Min	16216.586	279.515	-110.709	3.5583	1882.5531	4448.3343
Pile 8	Max	21860.332	259.552	-137.767	3.1171	2445.0182	4116.6908
Pile 8	Min	18714.807	250.931	-139.263	3.0356	2361.2876	3985.1545
Pile 9	Max	21393.5	217.199	-155.016	2.2927	2787.1608	3418.3145
Pile 9	Min	18190.776	209.196	-156.652	2.1982	2691.6893	3301.3446
Pile 10	Max	21518.987	180.568	-164.833	1.6679	2962.3154	2820.1893
Pile 10	Min	18341.901	172.626	-166.704	1.5612	2855.3347	2708.0124
Pile 11	Max	21488.172	144.205	-168.626	1.2756	3047.9383	2222.9304
Pile 11	Min	18311.439	136.319	-170.753	1.1607	2926.8062	2114.6465
Pile 12	Max	21495.022	109.034	-168.685	1.0528	3066.3483	1645.1546
Pile 12	Min	18318.872	101.214	-171.063	0.9278	2936.2235	1542.4991
Pile 13	Max	21493.933	74.668	-166.121	0.9084	3040.9593	1079.6331
Pile 13	Min	18318.51	66.922	-168.741	0.7792	2899.7594	982.8017
Pile 14	Max	21488.707	40.789	-161.416	0.8066	2973.2858	524.1193
Pile 14	Min	18313.811	33.127	-164.278	0.6675	2826.1084	431.4932
Pile 15	Max	21509.375	7.645	-154.798	0.6818	2874.0308	-20.5888
Pile 15	Min	18333.682	0.083	-157.896	0.5425	2717.4353	-107.1583
Pile 16	Max	21433.246	-24.137	-145.974	0.4404	2736.7649	-543.1057
Pile 16	Min	18230.777	-31.441	-149.242	0.2841	2573.6772	-619.6887
Pile 17	Max	21825.403	-56.019	-131.284	-0.1568	2509.3964	-1060.1533
Pile 17	Min	18508.642	-63.962	-135.137	-0.3168	2328.9514	-1144.2647
Pile 18	Max	22792.017	-83.101	-106.862	-1.3937	2102.4288	-1496.0826
Pile 18	Min	19478.666	-92.293	-111.701	-1.5759	1898.2619	-1586.9428
Pile 19	Max	19728.855	-92.542	-79.378	-2.5717	1590.4757	-1607.4804
Pile 19	Min	16906.142	-97.019	-81.797	-2.7814	1418.5112	-1666.2865
Pile 20	Max	14768.999	-115.802	-48.409	-2.5845	1069.5541	-1967.9516
Pile 20	Min	12650.717	-117.346	-49.207	-2.7785	924.5264	-2036.2088

Pile 21	Max	16338.766	-122.358	-25.095	-2.5388	665.5793	-2066.8999
Pile 21	Min	14522.218	-124.771	-26.533	-2.758	515.2542	-2123.7349
Pile 22	Max	14616.582	-128.43	-1.898	-2.814	304.7046	-2169.9034
Pile 22	Min	12443.517	-129.968	-2.851	-3.0265	168.0609	-2237.2268
Pile 23	Max	20102.418	-147.016	36.402	-3.2632	-209.5072	-2504.7239
Pile 23	Min	17421.481	-151.701	33.103	-3.491	-387.2963	-2636.7855
Pile 24	Max	21034.523	-132.923	71.305	-3.5691	-973.1711	-2165.9688
Pile 24	Min	18137.276	-138.771	67.229	-3.7502	-1184.894	-2228.6562
Pile 25	Max	17914.864	-150.269	116.406	-3.5888	-1758.001	-2393.0395
Pile 25	Min	15337.783	-154.201	113.777	-3.808	-1952.194	-2454.4826
Pile 26	Max	18096.853	-148.777	151.688	-3.9539	-2376.245	-2325.7608
Pile 26	Min	15566.632	-152.712	149.084	-4.2073	-2575.783	-2388.3046
Pile 27	Max	20577.892	-161.56	200.84	-3.7874	-3194.669	-2527.4568
Pile 27	Min	17580.124	-167.382	196.911	-3.9998	-3378.912	-2589.7939
Pile 28	Max	22641.977	-164.787	237.951	-1.1191	-3808.271	-2572.9951
Pile 28	Min	19289.016	-174.005	232.354	-1.3206	-4034.947	-2645.6922
Pile 29	Max	22221.766	-200.171	257.629	1.5554	-4186.354	-3110.0764
Pile 29	Min	18825.804	-208.867	252.853	1.3413	-4383.123	-3198.1054
Pile 30	Max	22523.916	-244.649	256.233	3.1586	-4202.674	-3815.165
Pile 30	Min	19158.818	-254.032	251.492	2.9803	-4396.115	-3913.4099
Pile 31	Max	19202.773	-299.375	241.816	3.9011	-3126.449	-3874.3761
Pile 31	Min	16017.567	-307.415	238.335	3.7194	-3263.476	-3946.1858
Pile 32	Max	18051.2	-353.593	226.768	4.1466	-2965.604	-4568.6867
Pile 32	Min	15064.794	-360.174	224.253	4.0008	-3087.116	-4626.0875
Pile 33	Max	18153.926	-395.757	204.812	4.2837	-2578.697	-4972.7874
Pile 33	Min	15239.357	-403.322	202.205	4.1272	-2682.101	-5045.37
Pile 34	Max	18848.81	-448.538	183.46	4.4422	-2291.315	-5853.7228
Pile 34	Min	15906.549	-453.296	181.934	4.3233	-2355.746	-5916.2332

Tableau des efforts agissant sur les piles pleines à L'ELA selon x :

Appuis	Max/ Min	N (kN)	H _{long}	H _{tras}	M _{torsion}	M _x	M _y
Culée 1	Max	1178.831	465.431	3082.886	1.43E-14	1541.4431	232.7157
Culée 1	Min	-453.736	-465.431	-3082.886	-1.43E-14	-1541.4431	-232.7157
Culée 1	Max	1170.699	465.475	3067.711	1.43E-14	1533.8553	232.7373
Culée 1	Min	-443.668	-465.475	-3067.711	-1.43E-14	-1533.8553	-232.7373
Culée 2	Max	1865.764	741.904	3050.543	3.29E-14	1525.2717	370.9518
Culée 2	Min	-1171.669	-741.904	-3050.543	-3.29E-14	-1525.2717	-370.9518
Culée 2	Max	1957.523	741.649	3036.482	3.29E-14	1518.2412	370.8245
Culée 2	Min	-968.839	-741.649	-3036.482	-3.29E-14	-1518.2412	-370.8245
Pile 1	Max	15239.225	8102.427	1573.302	58.2014	26994.2172	117896.6964
Pile 1	Min	-375.482	-8102.427	-1573.302	-58.2014	-26994.217	-117896.696
Pile 2	Max	15618.06	8061.021	1870.072	40.4909	32464.9344	117234.3397
Pile 2	Min	-1348.6	-8061.021	-1870.072	-40.4909	-32464.934	-117234.34
Pile 3	Max	16065.444	8066.997	1999.496	32.1769	34537.3781	117285.8313
Pile 3	Min	-1319.198	-8066.997	-1999.496	-32.1769	-34537.378	-117285.831
Pile 4	Max	14791.297	8069.406	1863.982	48.5235	31902.1366	117287.9133
Pile 4	Min	-428.437	-8069.406	-1863.982	-48.5235	-31902.136	-117287.913
Pile 5	Max	12827.397	8046.967	1703.94	60.0713	28950.0369	117106.6209
Pile 5	Min	-208.871	-8046.967	-1703.94	-60.0713	-28950.036	-117106.621
Pile 6	Max	12010.831	8047.185	1671.978	68.8121	28060.491	117354.813
Pile 6	Min	-352.987	-8047.185	-1671.978	-68.8121	-28060.491	-117354.813
Pile 7	Max	16527.493	8078.977	1567.809	72.6229	27651.2044	117722.1562
Pile 7	Min	-919.178	-8078.977	-1567.809	-72.6229	-27651.204	-117722.156
Pile 8	Max	18989.803	8105.015	1918.541	66.543	32886.3397	118488.7983
Pile 8	Min	-2026.718	-8105.015	-1918.541	-66.543	-32886.339	-118488.798
Pile 9	Max	18486.816	8137.104	2094.923	56.36	37866.1793	119648.4857
Pile 9	Min	-2499.373	-8137.104	-2094.923	-56.36	-37866.179	-119648.486
Pile 10	Max	18611.526	8108.72	2238.831	65.286	40452.2628	119657.0937
Pile 10	Min	-2641.174	-8108.72	-2238.831	-65.286	-40452.262	-119657.094
Pile 11	Max	18580.762	8032.677	2318.451	105.7898	41967.8996	118951.0005
Pile 11	Min	-2654.334	-8032.677	-2318.451	-105.7898	-41967.899	-118951
Pile 12	Max	18588.063	7998.621	2381.491	109.3003	43071.6684	118574.382
Pile 12	Min	-2691.109	-7998.621	-2381.491	-109.3003	-43071.668	-118574.382
Pile 13	Max	18587.508	7911.79	2408.989	87.961	43458.3827	117753.0198
Pile 13	Min	-2730.135	-7911.79	-2408.989	-87.961	-43458.382	-117753.02
Pile 14	Max	18582.648	7811.832	2618.437	66.4495	42336.1232	117115.67
Pile 14	Min	-2700.328	-7811.832	-2618.437	-66.4495	-42336.123	-117115.67
Pile 15	Max	18602.838	7738.342	2837.003	57.7595	44128.1761	116773.6919
Pile 15	Min	-2742.592	-7738.342	-2837.003	-57.7595	-44128.176	-116773.692
Pile 16	Max	18522.5	7738.155	2805.001	70.9498	43384.2848	117514.7636
Pile 16	Min	-2638.336	-7738.155	-2805.001	-70.9498	-43384.284	-117514.764
Pile 17	Max	18824.195	7649.978	2742.743	95.0093	41402.7716	116796.1885
Pile 17	Min	-2208.102	-7649.978	-2742.743	-95.0093	-41402.776	-116796.189
Pile 18	Max	19748.264	7474.161	2823.653	96.3383	40648.9929	114252.7624
Pile 18	Min	-1812.78	-7474.161	-2823.653	-96.3383	-40648.992	-114252.762
Pile 19	Max	17223.579	7122.972	2937.916	102.0642	41366.432	108590.9504
Pile 19	Min	-907.435	-7122.972	-2937.916	-102.0642	-41366.432	-108590.95
Pile 20	Max	13040.927	7000.897	3368.552	96.8435	47231.9048	106448.5646
Pile 20	Min	-458.926	-7000.897	-3368.552	-96.8435	-47231.904	-106448.565

Pile 21	Max	14634.887	6860.462	3610.367	72.2765	51287.9084	104547.5625
Pile 21	Min	-640.159	-6860.462	-3610.367	-72.2765	-51287.908	-104547.562
Pile 22	Max	12888.707	6823.572	3643.72	55.3379	52763.7851	104293.3223
Pile 22	Min	-500.551	-6823.572	-3643.72	-55.3379	-52763.785	-104293.322
Pile 23	Max	17639.571	6832.27	3644.21	54.0759	53908.1444	105877.0538
Pile 23	Min	-1230.079	-6832.27	-3644.21	-54.0759	-53908.144	-105877.054
Pile 24	Max	18402.284	6949.247	3605.107	72.1802	52973.8772	108665.27
Pile 24	Min	-1452.831	-6949.247	-3605.107	-72.1802	-52973.877	-108665.27
Pile 25	Max	15734.678	7007.961	3264.282	117.1718	46824.7511	109521.3258
Pile 25	Min	-2020.126	-7007.961	-3264.282	-117.1718	-46824.751	-109521.326
Pile 26	Max	15917.487	7083.734	3106.819	160.9745	43362.7667	111012.254
Pile 26	Min	-2117.819	-7083.734	-3106.819	-160.9745	-43362.766	-111012.254
Pile 27	Max	17871.72	7221.451	3168.673	156.4192	45360.94	113514.3189
Pile 27	Min	-1411.938	-7221.451	-3168.673	-156.4192	-45360.94	-113514.319
Pile 28	Max	19586.5	7486.417	3584.431	108.0252	56084.7412	117583.6593
Pile 28	Min	-1910.548	-7486.417	-3584.431	-108.0252	-56084.741	-117583.659
Pile 29	Max	19142.903	7679.414	3887.299	48.5896	62965.425	119616.2316
Pile 29	Min	-2348.823	-7679.414	-3887.299	-48.5896	-62965.425	-119616.232
Pile 30	Max	19455.938	7628.249	3735.217	96.2905	61499.4938	118063.7258
Pile 30	Min	-2088.025	-7628.249	-3735.217	-96.2905	-61499.493	-118063.726
Pile 31	Max	16312.681	7092.159	2936.881	129.2151	38357.3172	89618.1531
Pile 31	Min	-1916.174	-7092.159	-2936.881	-129.2151	-38357.317	-89618.1531
Pile 32	Max	15377.53	6924.502	2877.305	122.3305	37349.3637	87600.7749
Pile 32	Min	-2660.66	-6924.502	-2877.305	-122.3305	-37349.363	-87600.7749
Pile 33	Max	15483.952	6907.016	2683.159	97.2827	34806.7167	84710.0926
Pile 33	Min	-2771.93	-6907.016	-2683.159	-97.2827	-34806.716	-84710.0926
Pile 34	Max	16204.572	6940.044	2448.422	109.7145	32220.8074	86270.161
Pile 34	Min	-2388.583	-6940.044	-2448.422	-109.7145	-32220.807	-86270.161

Tableau des efforts agissant sur les piles pleines à L'ELA selon y :

Appuis	Max/ Min	N (kN)	H _{long}	H _{tras}	M _{torsion}	M _x	M _y
Culée 1	Max	1440.756	1551.438	924.866	4.75E-14	462.4329	775.719
Culée 1	Min	-1440.756	-1551.438	-924.866	-4.75E-14	-462.4329	-775.719
Culée 1	Max	1478.895	1551.582	920.313	4.75E-14	460.1566	775.7911
Culée 1	Min	-1478.895	-1551.582	-920.313	-4.75E-14	-460.1566	-775.7911
Culée 2	Max	2283.515	1506.401	1022.431	4.90E-14	511.2157	753.2005
Culée 2	Min	-2283.515	-1506.401	-1022.431	-4.90E-14	-511.2157	-753.2005
Culée 2	Max	2374.245	1506.774	1096.113	4.95E-14	548.0563	753.387
Culée 2	Min	-2374.245	-1506.774	-1096.113	-4.95E-14	-548.0563	-753.387
Pile 1	Max	15239.225	2430.728	5244.339	194.0047	89980.7241	35369.0089
Pile 1	Min	-217.763	-2430.728	-5244.339	-194.0047	-89980.7241	-35369.0089
Pile 2	Max	15618.06	2418.306	6233.573	116.5947	108216.4479	35170.3019
Pile 2	Min	-1348.6	-2418.306	-6233.573	-116.5947	-108216.448	-35170.3019
Pile 3	Max	16065.444	2420.099	6664.986	80.7423	115124.5937	35185.7494
Pile 3	Min	-1319.198	-2420.099	-6664.986	-80.7423	-115124.594	-35185.7494
Pile 4	Max	14791.297	2420.822	6213.274	161.7449	106340.4553	35186.374
Pile 4	Min	-428.437	-2420.822	-6213.274	-161.7449	-106340.455	-35186.374
Pile 5	Max	12827.397	2414.09	5679.799	200.2377	96500.123	35131.9863
Pile 5	Min	-208.871	-2414.09	-5679.799	-200.2377	-96500.123	-35131.9863
Pile 6	Max	12010.831	2414.155	5573.259	229.3736	93534.9701	35206.4439
Pile 6	Min	-352.987	-2414.155	-5573.259	-229.3736	-93534.9701	-35206.4439
Pile 7	Max	16527.493	2423.693	5226.029	242.0764	92170.6815	35316.6469
Pile 7	Min	-919.178	-2423.693	-5226.029	-242.0764	-92170.6815	-35316.6469
Pile 8	Max	18989.803	2431.504	6106.152	221.8099	109621.1324	35546.6395
Pile 8	Min	-2026.718	-2431.504	-6106.152	-221.8099	-109621.132	-35546.6395
Pile 9	Max	18486.816	2441.131	6963.664	187.8666	126220.5978	35894.5457
Pile 9	Min	-2499.373	-2441.131	-6963.664	-187.8666	-126220.598	-35894.5457
Pile 10	Max	18611.526	2432.616	7462.769	185.8118	134840.8759	35897.1281
Pile 10	Min	-2641.174	-2432.616	-7462.769	-185.8118	-134840.876	-35897.1281
Pile 11	Max	18580.762	2409.803	7728.171	180.1341	139892.9987	35685.3001
Pile 11	Min	-2654.334	-2409.803	-7728.171	-180.1341	-139892.999	-35685.3001
Pile 12	Max	18588.063	2513.867	7938.304	136.6507	143572.2279	39806.6434
Pile 12	Min	-2691.109	-2513.867	-7938.304	-136.6507	-143572.228	-39806.6434
Pile 13	Max	18587.508	2721.234	8029.963	86.1799	144861.2755	43371.9568
Pile 13	Min	-2730.135	-2721.234	-8029.963	-86.1799	-144861.276	-43371.9568
Pile 14	Max	18582.648	2734.459	7832.925	108.983	141120.4107	43370.8967
Pile 14	Min	-2700.328	-2734.459	-7832.925	-108.983	-141120.411	-43370.8967
Pile 15	Max	18602.838	2603.007	7559.322	161.9333	135530.7109	40255.4169
Pile 15	Min	-2742.592	-2603.007	-7559.322	-161.9333	-135530.711	-40255.4169
Pile 16	Max	18522.5	2461.859	7307	189.4754	130106.2141	36534.0969
Pile 16	Min	-2638.336	-2461.859	-7307	-189.4754	-130106.214	-36534.0969
Pile 17	Max	18824.195	2493.987	7019.553	181.5831	124326.5852	35713.1269
Pile 17	Min	-2208.102	-2493.987	-7019.553	-181.5831	-124326.585	-35713.1269
Pile 18	Max	19748.264	2686.873	6555.581	161.6855	114763.6108	37752.8491
Pile 18	Min	-1812.78	-2686.873	-6555.581	-161.6855	-114763.611	-37752.8491
Pile 19	Max	17223.579	2950.251	5669.725	162.5992	97872.6145	41212.1717
Pile 19	Min	-907.435	-2950.251	-5669.725	-162.5992	-97872.6145	-41212.1717
Pile 20	Max	13040.927	3411.742	5635.414	146.6809	93927.7776	48031.9243
Pile 20	Min	-458.926	-3411.742	-5635.414	-146.6809	-93927.7776	-48031.9243

Pile 21	Max	14634.887	3647.906	5581.701	128.5467	92287.0644	52408.3323
Pile 21	Min	-640.159	-3647.906	-5581.701	-128.5467	-92287.0644	-52408.3323
Pile 22	Max	12888.707	3795.622	5591.284	120.2486	93418.6674	55458.6372
Pile 22	Min	-500.551	-3795.622	-5591.284	-120.2486	-93418.6674	-55458.6372
Pile 23	Max	17639.571	3836.83	5775.555	106.9338	98409.5019	58064.6039
Pile 23	Min	-1230.079	-3836.83	-5775.555	-106.9338	-98409.5019	-58064.6039
Pile 24	Max	18402.284	3852.387	6197.72	93.354	105309.3352	58878.4449
Pile 24	Min	-1452.831	-3852.387	-6197.72	-93.354	-105309.335	-58878.4449
Pile 25	Max	15734.678	3469.753	5965.55	167.3175	102180.2682	51294.6456
Pile 25	Min	-2020.126	-3469.753	-5965.55	-167.3175	-102180.268	-51294.6456
Pile 26	Max	15917.487	3115.311	5932.014	236.655	100959.0409	43713.4417
Pile 26	Min	-2117.819	-3115.311	-5932.014	-236.655	-100959.041	-43713.4417
Pile 27	Max	17871.72	2898.079	6165.765	262.5229	105776.4061	40414.7579
Pile 27	Min	-1411.938	-2898.079	-6165.765	-262.5229	-105776.406	-40414.7579
Pile 28	Max	19586.5	3206.939	7047.731	211.434	123696.2374	49098.3249
Pile 28	Min	-1910.548	-3206.939	-7047.731	-211.434	-123696.237	-49098.3249
Pile 29	Max	19142.903	3572.018	7876.994	96.8088	140271.0522	57694.6427
Pile 29	Min	-2348.823	-3572.018	-7876.994	-96.8088	-140271.052	-57694.6427
Pile 30	Max	19455.938	3495.891	7941.255	109.0056	146942.0003	58336.4323
Pile 30	Min	-2088.025	-3495.891	-7941.255	-109.0056	-146942	-58336.4323
Pile 31	Max	16312.681	2672.556	7359.577	191.2686	103782.8311	35203.7632
Pile 31	Min	-1916.174	-2672.556	-7359.577	-191.2686	-103782.831	-35203.7632
Pile 32	Max	15377.53	2454.662	6544.473	217.8326	96059.7991	31938.9036
Pile 32	Min	-2660.66	-2454.662	-6544.473	-217.8326	-96059.7991	-31938.9036
Pile 33	Max	15483.952	2268.153	5641.451	219.3454	82983.2466	27953.1217
Pile 33	Min	-2771.93	-2268.153	-5641.451	-219.3454	-82983.2466	-27953.1217
Pile 34	Max	16204.572	2082.013	4584.332	235.4286	67030.992	25881.0483
Pile 34	Min	-2388.583	-2082.013	-4584.332	-235.4286	-67030.992	-25881.0483

Tableau des efforts agissant sur les piles pleines a L'ELA selon z

Appuis	Max/ Min	N (kN)	H _{long}	H _{tras}	M _{torsion}	M _x	M _y
Culée 1	Max	1178.831	465.431	924.866	1.43E-14	462.4329	232.7157
Culée 1	Min	-441.254	-465.431	-924.866	-1.43E-14	-462.4329	-232.7157
Culée 1	Max	1170.699	465.475	920.313	1.43E-14	460.1566	232.7373
Culée 1	Min	-452.778	-465.475	-920.313	-1.43E-14	-460.1566	-232.7373
Culée 2	Max	1865.764	451.92	915.163	1.47E-14	457.5815	225.9602
Culée 2	Min	-1178.224	-451.92	-915.163	-1.47E-14	-457.5815	-225.9602
Culée 2	Max	1957.523	452.032	910.945	1.49E-14	455.4724	226.0161
Culée 2	Min	-1254.135	-452.032	-910.945	-1.49E-14	-455.4724	-226.0161
Pile 1	Max	15239.225	2430.728	1573.302	58.2014	26994.2172	35369.0089
Pile 1	Min	-725.877	-2430.728	-1573.302	-58.2014	-26994.2172	-35369.0089
Pile 2	Max	15618.06	2418.306	1870.072	34.9784	32464.9344	35170.3019
Pile 2	Min	-4495.334	-2418.306	-1870.072	-34.9784	-32464.9344	-35170.3019
Pile 3	Max	16065.444	2420.099	1999.496	24.2227	34537.3781	35185.7494
Pile 3	Min	-4397.326	-2420.099	-1999.496	-24.2227	-34537.3781	-35185.7494
Pile 4	Max	14791.297	2420.822	1863.982	48.5235	31902.1366	35186.374
Pile 4	Min	-1428.122	-2420.822	-1863.982	-48.5235	-31902.1366	-35186.374
Pile 5	Max	12827.397	2414.09	1703.94	60.0713	28950.0369	35131.9863
Pile 5	Min	-555.953	-2414.09	-1703.94	-60.0713	-28950.0369	-35131.9863
Pile 6	Max	12010.831	2414.155	1671.978	68.8121	28060.491	35206.4439
Pile 6	Min	-1105.901	-2414.155	-1671.978	-68.8121	-28060.491	-35206.4439
Pile 7	Max	16527.493	2423.693	1567.809	72.6229	27651.2044	35316.6469
Pile 7	Min	-3063.928	-2423.693	-1567.809	-72.6229	-27651.2044	-35316.6469
Pile 8	Max	18989.803	2431.504	1831.846	66.543	32886.3397	35546.6395
Pile 8	Min	-6755.727	-2431.504	-1831.846	-66.543	-32886.3397	-35546.6395
Pile 9	Max	18486.816	2441.131	2089.099	56.36	37866.1793	35894.5457
Pile 9	Min	-8331.245	-2441.131	-2089.099	-56.36	-37866.1793	-35894.5457
Pile 10	Max	18611.526	2432.616	2238.831	55.7435	40452.2628	35897.1281
Pile 10	Min	-8803.912	-2432.616	-2238.831	-55.7435	-40452.2628	-35897.1281
Pile 11	Max	18580.762	2409.803	2318.451	54.0402	41967.8996	35685.3001
Pile 11	Min	-8847.779	-2409.803	-2318.451	-54.0402	-41967.8996	-35685.3001
Pile 12	Max	18588.063	2399.586	2381.491	40.9952	43071.6684	35572.3146
Pile 12	Min	-8970.362	-2399.586	-2381.491	-40.9952	-43071.6684	-35572.3146
Pile 13	Max	18587.508	2373.537	2408.989	26.3883	43458.3827	35325.9059
Pile 13	Min	-9100.449	-2373.537	-2408.989	-26.3883	-43458.3827	-35325.9059
Pile 14	Max	18582.648	2343.55	2349.877	32.6949	42336.1232	35134.701
Pile 14	Min	-9001.093	-2343.55	-2349.877	-32.6949	-42336.1232	-35134.701
Pile 15	Max	18602.838	2321.503	2267.796	48.58	40659.2133	35032.1076
Pile 15	Min	-9141.973	-2321.503	-2267.796	-48.58	-40659.2133	-35032.1076
Pile 16	Max	18522.5	2321.447	2192.1	56.8426	39031.8642	35254.4291
Pile 16	Min	-8794.453	-2321.447	-2192.1	-56.8426	-39031.8642	-35254.4291
Pile 17	Max	18824.195	2294.993	2105.866	54.4749	37297.9756	35038.8566
Pile 17	Min	-7360.34	-2294.993	-2105.866	-54.4749	-37297.9756	-35038.8566
Pile 18	Max	19748.264	2242.248	1966.674	48.5056	34429.0832	34275.8287
Pile 18	Min	-6042.599	-2242.248	-1966.674	-48.5056	-34429.0832	-34275.8287
Pile 19	Max	17223.579	2136.892	1700.917	48.7798	29361.7844	32577.2851
Pile 19	Min	-3024.783	-2136.892	-1700.917	-48.7798	-29361.7844	-32577.2851
Pile 20	Max	13040.927	2100.269	1690.624	44.0043	28178.3333	31934.5694
Pile 20	Min	-1529.755	-2100.269	-1690.624	-44.0043	-28178.3333	-31934.5694

Pile 21	Max	14634.887	2058.139	1674.51	38.564	27686.1193	31364.2687
Pile 21	Min	-2133.862	-2058.139	-1674.51	-38.564	-27686.1193	-31364.2687
Pile 22	Max	12888.707	2047.072	1677.385	36.0746	28025.6002	31287.9967
Pile 22	Min	-1668.504	-2047.072	-1677.385	-36.0746	-28025.6002	-31287.9967
Pile 23	Max	17639.571	2049.681	1732.667	32.0801	29522.8506	31763.1161
Pile 23	Min	-4100.262	-2049.681	-1732.667	-32.0801	-29522.8506	-31763.1161
Pile 24	Max	18402.284	2084.774	1859.316	28.0062	31592.8005	32599.581
Pile 24	Min	-4842.771	-2084.774	-1859.316	-28.0062	-31592.8005	-32599.581
Pile 25	Max	15734.678	2102.388	1789.665	50.1953	30654.0805	32856.3977
Pile 25	Min	-6733.753	-2102.388	-1789.665	-50.1953	-30654.0805	-32856.3977
Pile 26	Max	15917.487	2125.12	1779.604	70.9965	30287.7123	33303.6762
Pile 26	Min	-7059.398	-2125.12	-1779.604	-70.9965	-30287.7123	-33303.6762
Pile 27	Max	17871.72	2166.435	1849.729	78.7569	31732.9218	34054.2957
Pile 27	Min	-4706.459	-2166.435	-1849.729	-78.7569	-31732.9218	-34054.2957
Pile 28	Max	19586.5	2245.925	2114.319	63.4302	37108.8712	35275.0978
Pile 28	Min	-6368.493	-2245.925	-2114.319	-63.4302	-37108.8712	-35275.0978
Pile 29	Max	19142.903	2303.824	2363.098	29.0426	42081.3157	35884.8695
Pile 29	Min	-7829.412	-2303.824	-2363.098	-29.0426	-42081.3157	-35884.8695
Pile 30	Max	19455.938	2288.475	2382.377	32.7017	44082.6001	35419.1177
Pile 30	Min	-6960.084	-2288.475	-2382.377	-32.7017	-44082.6001	-35419.1177
Pile 31	Max	16312.681	2127.648	2207.873	57.3806	31134.8493	26885.4459
Pile 31	Min	-6387.245	-2127.648	-2207.873	-57.3806	-31134.8493	-26885.4459
Pile 32	Max	15377.53	2077.351	1963.342	65.3498	28817.9397	26280.2325
Pile 32	Min	-8868.866	-2077.351	-1963.342	-65.3498	-28817.9397	-26280.2325
Pile 33	Max	15483.952	2072.105	1692.435	65.8036	24894.974	25413.0278
Pile 33	Min	-9239.766	-2072.105	-1692.435	-65.8036	-24894.974	-25413.0278
Pile 34	Max	16204.572	2082.013	1375.3	70.6286	20109.2976	25881.0483
Pile 34	Min	-7961.944	-2082.013	-1375.3	-70.6286	-20109.2976	-25881.0483

Modes et périodes propres

Modes	Periodes T (S)	Ux	Uy	Uz	SUM Ux	SUM Uy	SUM Uz
1	2,078197	0,03628	0,19089	1,193E-09	0,03628	0,19089	1,193E-09
2	2,060909	0,00069	0,1507	4,248E-09	0,03697	0,34159	5,441E-09
3	2,015756	0,02498	0,00542	2,354E-10	0,06195	0,34701	5,676E-09
4	1,939002	0,47547	0,05146	1,578E-08	0,53742	0,39847	2,146E-08
5	1,91517	0,01308	0,01298	2,11E-09	0,5505	0,41146	2,357E-08
6	1,854755	0,03018	0,0545	3,008E-11	0,58068	0,46595	2,36E-08
7	1,779118	0,02047	0,04132	4,85E-14	0,60115	0,50727	2,36E-08
8	1,667818	0,00115	0,04826	6,768E-11	0,60231	0,55553	2,367E-08
9	1,601773	0,00097	0,023	3,611E-10	0,60328	0,57853	2,403E-08
10	1,526758	2,31E-06	0,00671	2,294E-10	0,60328	0,58524	2,426E-08
11	1,377411	0,00065	0,00088	7,284E-11	0,60393	0,58612	2,433E-08
12	1,261296	9,79E-05	0,00199	7,453E-11	0,60403	0,58811	2,441E-08
13	1,152266	9,15E-07	9,937E-05	5,144E-11	0,60403	0,58821	2,446E-08
14	1,033958	9,73E-06	0,00029	7,794E-11	0,60404	0,5885	2,454E-08
15	0,922398	8,69E-06	2,81E-05	3,094E-11	0,60405	0,58853	2,457E-08
16	0,821746	6,99E-05	0,00077	7,002E-11	0,60412	0,5893	2,464E-08
17	0,732668	2,05E-05	2,224E-05	1,454E-09	0,60414	0,58932	2,609E-08
18	0,721904	6,11E-05	2,438E-07	5,271E-08	0,6042	0,58932	7,88E-08
19	0,655341	1,69E-08	9,616E-05	2,522E-10	0,6042	0,58942	7,905E-08
20	0,589146	1,61E-06	4,012E-05	3,093E-09	0,60421	0,58946	8,214E-08
21	0,529958	8,06E-07	4,936E-05	5,66E-10	0,60421	0,58951	8,271E-08
22	0,480397	4,33E-06	5,606E-07	3,564E-08	0,60421	0,58951	1,183E-07
23	0,436018	1,23E-06	1,256E-05	6,693E-08	0,60421	0,58952	1,853E-07
24	0,397966	2,28E-07	8,34E-07	1,288E-07	0,60421	0,58952	3,141E-07
25	0,393232	3,65E-06	1,062E-05	7,536E-08	0,60422	0,58953	3,894E-07
26	0,38177	8,72E-08	6,297E-10	3,511E-06	0,60422	0,58953	3,901E-06
27	0,366915	5,93E-08	1,695E-07	5,797E-06	0,60422	0,58953	9,698E-06
28	0,364014	6,86E-09	7,08E-07	2,951E-09	0,60422	0,58953	9,701E-06
29	0,354419	2,87E-08	3,01E-08	6,589E-05	0,60422	0,58953	7,56E-05
30	0,334471	7,18E-09	1,309E-07	8,656E-08	0,60422	0,58953	7,568E-05
31	0,333743	2,75E-08	3,524E-08	4,359E-10	0,60422	0,58953	7,568E-05
32	0,326876	1,10E-08	3,341E-07	0,00137	0,60422	0,58953	0,00144
33	0,309025	7,44E-08	8,694E-08	0,00049	0,60422	0,58953	0,00193
34	0,308244	2,67E-06	6,18E-09	1,203E-06	0,60422	0,58953	0,00194
35	0,292843	1,91E-06	5,303E-07	0,00235	0,60422	0,58953	0,00428
36	0,290409	6,69E-08	1,238E-07	0,00511	0,60422	0,58953	0,0094
37	0,285017	2,14E-06	4,774E-06	1,219E-06	0,60422	0,58954	0,0094
38	0,284586	3,08E-06	1,999E-06	9,819E-05	0,60423	0,58954	0,0095
39	0,267215	0,0004	0,00015	4,494E-06	0,60462	0,58969	0,0095
40	0,264346	2,02E-05	9,316E-06	0,00019	0,60464	0,58969	0,00969
41	0,264083	1,94E-05	6,717E-07	1,272E-05	0,60466	0,5897	0,0097
42	0,262737	5,49E-09	1,537E-07	0,00304	0,60466	0,5897	0,01274
43	0,245885	4,06E-08	1,861E-08	1,011E-07	0,60466	0,5897	0,01274
44	0,244288	1,28E-06	1,418E-07	0,00108	0,60466	0,5897	0,01382
45	0,235598	2,56E-05	2,598E-05	0,00105	0,60469	0,58972	0,01487
46	0,232801	0,00058	1,506E-05	6,845E-07	0,60527	0,58974	0,01487
47	0,232713	0,00254	0,0018	3,195E-07	0,60781	0,59153	0,01487
48	0,232631	9,83E-06	0,00034	3,364E-06	0,60782	0,59188	0,01487

49	0,232589	0,00174	4,739E-05	2,771E-06	0,60956	0,59192	0,01488
50	0,232584	0,00022	4,043E-05	4,869E-05	0,60978	0,59196	0,01493
51	0,232569	7,70E-05	7,944E-05	1,892E-06	0,60986	0,59204	0,01493
52	0,232561	0,00033	0,00016	2,939E-06	0,61018	0,59221	0,01493
53	0,232559	5,78E-05	4,696E-06	1,059E-05	0,61024	0,59221	0,01494
54	0,232557	0,00012	1,177E-06	2,205E-07	0,61036	0,59221	0,01494
55	0,232551	0,00019	0,00013	5,841E-06	0,61056	0,59234	0,01495
56	0,23255	0,00038	1,817E-05	5,377E-06	0,61093	0,59236	0,01495
57	0,232548	1,75E-05	2,1E-05	3,409E-06	0,61095	0,59238	0,01496
58	0,232545	9,19E-05	6,349E-05	2,974E-06	0,61104	0,59244	0,01496
59	0,232544	2,18E-05	5,262E-07	3,104E-07	0,61106	0,59244	0,01496
60	0,232541	0,00031	4,883E-05	1,097E-06	0,61137	0,59249	0,01496

Tableau des efforts agissant sur les piles creuses a L'ELU fondamental

Appuis	Max/Min	N (kN)	H _{long}	H _{tras}	M _{torsion}	M _x	M _y
Culée 1	Max	2265.67	19875,275	674,01	-32,777	4,389	580,5054
Culée 1	Min	1486.251	16700,611	669,167	-32,898	4,3545	500,8845
Culée 1	Max	2267.701	20585,416	634,38	-61,134	4,0833	1097,619
Culée 1	Min	1489.839	17242,274	628,693	-61,342	4,0362	1007,7509
Culée 2	Max	3298.994	21272,311	585,806	-85,832	3,7964	1527,2381
Culée 2	Min	2428.344	17862,448	579,477	-86,195	3,7287	1436,2231
Culée 2	Max	3308.598	19165,103	548,283	-110,64	3,8448	1955,8428
Culée 2	Min	2509.441	16136,448	544,1	-110,973	3,7874	1872,0065
Pile 1	Max	23485.196	15948,452	506,913	-127,156	4,38	2260,6666
Pile 1	Min	20301.956	13392,95	504,536	-127,363	4,3018	2179,2202
Pile 2	Max	24147.032	14858,344	480,17	-147,655	5,019	2638,3966
Pile 2	Min	20802.629	12120,222	478,296	-147,864	4,946	2547,3637
Pile 3	Max	24856.122	22153,222	431,398	-167,113	5,4863	2943,6779
Pile 3	Min	21443.235	18335,621	425,414	-168,008	5,3931	2858,5938
Pile 4	Max	22750.143	26299,506	393,238	-208,775	4,7213	3697,2396
Pile 4	Min	19712.2	21738,996	380,39	-210,989	4,6015	3577,9679
Pile 5	Max	19546.184	25667,341	329,191	-234,931	3,4676	4211,6599
Pile 5	Min	16970.558	21025,73	317,265	-237,347	3,3286	4075,5857
Pile 6	Max	18423.947	25836,166	273,319	-249,75	2,5153	4477,9253
Pile 6	Min	15664.928	21231,61	261,48	-252,516	2,3596	4325,8519
Pile 7	Max	25753.708	25795,005	218,021	-255,446	1,9183	4606,3137
Pile 7	Min	21926.185	21190,991	206,265	-258,589	1,7507	4434,5468
Pile 8	Max	29875.362	25804,015	164,514	-255,452	1,5793	4632,7373
Pile 8	Min	25314.351	21200,868	152,854	-258,968	1,3967	4447,9503
Pile 9	Max	29245.945	25802,526	112,243	-251,461	1,3611	4591,9827
Pile 9	Min	24601.996	21200,453	100,691	-255,334	1,1724	4391,6564
Pile 10	Max	29416.114	25795,485	60,748	-244,209	1,2075	4487,4732
Pile 10	Min	24809.338	21194,19	49,319	-248,441	1,0044	4278,0654
Pile 11	Max	29374.334	25823,327	10,378	-234,037	1,0186	4334,2449
Pile 11	Min	24768.071	21220,868	-0,903	-238,62	0,8152	4111,3804
Pile 12	Max	29383.573	25720,466	-37,964	-220,466	0,6481	4121,7332
Pile 12	Min	24778.155	21079,554	-48,864	-225,302	0,4223	3889,5676
Pile 13	Max	29382.046	26261,591	-86,169	-198,141	-0,260	3773,6079
Pile 13	Min	24777.682	21454,99	-98,018	-203,839	-0,493	3516,0456
Pile 14	Max	29374.918	27577,889	-127,267	-161,024	-2,141	3156,0512
Pile 14	Min	24771.318	22774,583	-140,968	-168,178	-2,406	2862,9071
Pile 15	Max	29402.995	23357,973	-143,05	-118,337	-3,933	2366,7523
Pile 15	Min	24798.242	19270,357	-149,793	-121,923	-4,237	2122,4126
Pile 16	Max	29300.123	16593,553	-176,915	-72,104	-3,955	1586,3258
Pile 16	Min	24656.544	13532,438	-179,305	-73,286	-4,234	1382,9369
Pile 17	Max	29840.509	18666,686	-187,28	-36,493	-3,885	972,0564
Pile 17	Min	25031.205	16035,203	-190,927	-38,604	-4,203	761,4032
Pile 18	Max	31155.488	16389,124	-196,919	-0,903	-4,303	411,448
Pile 18	Min	26351.128	13251,125	-199,301	-2,331	-4,609	219,9525
Pile 19	Max	26950.89	23861,473	-223,691	56,108	-4,983	-373,481
Pile 19	Min	22857.957	19976,642	-230,737	51,2	-5,312	-626,5357
Pile 20	Max	20150.332	25166,911	-205,277	110,863	-5,438	-1528,166
Pile 20	Min	17078.823	20967,069	-214,03	104,821	-5,699	-1832,089

Pile 21	Max	22277.588	20891,514	-230,565	178,316	-5,461	-2704,112
Pile 21	Min	19643.592	17157,893	-236,508	174,417	-5,777	-2980,124
Pile 22	Max	19943.288	21135,61	-229,665	232,349	-6,003	-3646,740
Pile 22	Min	16792.344	17468,97	-235,608	228,488	-6,369	-3930,351
Pile 23	Max	27455.988	24540,149	-248,514	305,811	-5,738	-4869,559
Pile 23	Min	23568.629	20195,966	-257,245	299,972	-6,048	-5133,357
Pile 24	Max	28744.187	27371,605	-255,588	362,26	-1,707	-5800,043
Pile 24	Min	24543.178	22511,799	-269,334	353,968	-2,000	-6126,806
Pile 25	Max	24466.375	26805,52	-309,483	391,571	2,3181	-6366,200
Pile 25	Min	20729.607	21884,164	-322,436	384,496	2,0103	-6647,721
Pile 26	Max	24713.329	27212,981	-377,273	389,414	4,7263	-6407,886
Pile 26	Min	21044.508	22335,776	-391,238	382,387	4,4715	-6686,723
Pile 27	Max	28120.483	24337,399	-445,432	359,804	5,8113	-4631,163
Pile 27	Min	23773.718	19721,479	-457,072	354,842	5,5439	-4817,974
Pile 28	Max	30952.34	22756,416	-524,888	336,924	6,2006	-4402,008
Pile 28	Min	26090.548	18428,727	-534,449	333,341	5,9849	-4566,805
Pile 29	Max	30384.569	22904,553	-588,643	304,802	6,4298	-3842,723
Pile 29	Min	25460.425	18680,046	-599,645	301,07	6,2002	-3983,676
Pile 30	Max	30793.297	23820,04	-665,397	272,518	6,6856	-3427,401
Pile 30	Min	25913.905	19557,816	-672,22	270,349	6,5103	-3513,943
Pile 31	Max	26286.3	2272,828	-7,357	-363,482	0	182,6474
Pile 31	Min	21667.751	1491,347	-7,654	-365,295	0	181,7409
Pile 32	Max	24704.027	2276,994	-2,831	-361,463	0	181,6337
Pile 32	Min	20373.739	1497,415	-3,154	-363,267	0	180,7316
Pile 33	Max	24843.113	3307,153	3,893	388,067	0	-191,7433
Pile 33	Min	20616.987	2435,012	3,506	383,487	0	-194,0337
Pile 34	Max	25781.513	3308,654	9,588	391,027	0	-193,1992
Pile 34	Min	21515.234	2508,845	9,193	386,398	0	-195,5133

Tableau des efforts agissant sur les piles creuses a L'ELA selon x :

Appuis	Max/ Min	N (kN)	H _{long}	H _{tras}	M _{torsion}	M _x	M _y
pile 1	Max	12570,573	7026,545	1399,304	58,573	24862,1005	106931,3583
pile 1	Min	-485,47	-7026,545	-1399,304	-58,573	-24862,1005	-106931,358
pile 2	Max	12979,022	7054,781	1697,257	36,4906	30259,5951	107257,2778
pile 2	Min	-1530,782	-7054,781	-1697,257	-36,4906	-30259,5951	-107257,278
pile 3	Max	13411,829	7032,799	1799,267	31,4128	32035,5011	106970,9154
pile 3	Min	-1455,053	-7032,799	-1799,267	-31,4128	-32035,5011	-106970,915
pile 4	Max	12140,262	7005,011	1659,022	58,8731	29482,2519	106712,5301
pile 4	Min	-460,683	-7005,011	-1659,022	-58,8731	-29482,2519	-106712,53
pile 5	Max	10171,287	7025,401	1541,804	60,2541	27172,9544	107026,0897
pile 5	Min	-185,141	-7025,401	-1541,804	-60,2541	-27172,9544	-107026,09
pile 6	Max	9376,559	7033,438	1469,338	68,5839	25942,4313	107250,5186
pile 6	Min	-350,17	-7033,438	-1469,338	-68,5839	-25942,4313	-107250,519
pile 7	Max	13865,58	7053,663	1470,589	74,3976	26520,6097	107706,0367
pile 7	Min	-929,59	-7053,663	-1470,589	-74,3976	-26520,6097	-107706,037
pile 8	Max	16340,587	7130,826	1768,662	67,0345	32022,0901	109205,0763
pile 8	Min	-2087,358	-7130,826	-1768,662	-67,0345	-32022,0901	-109205,076
pile 9	Max	15836,87	7136,614	2049,519	56,7232	37183,421	109904,3302
pile 9	Min	-2568,236	-7136,614	-2049,519	-56,7232	-37183,421	-109904,33
pile 10	Max	15960,693	7142,708	2197,255	67,5121	39781,6217	110335,7615
pile 10	Min	-2724,944	-7142,708	-2197,255	-67,5121	-39781,6217	-110335,761
pile 11	Max	15930,396	7126,251	2280,279	101,3834	41329,4233	110193,1994
pile 11	Min	-2756,704	-7126,251	-2280,279	-101,3834	-41329,4233	-110193,199
pile 12	Max	15937,528	7018,292	2335,138	109,9181	42342,5102	108887,7456
pile 12	Min	-2798,578	-7018,292	-2335,138	-109,9181	-42342,5102	-108887,746
pile 13	Max	15937,002	6952,495	2362,193	86,6883	42726,5173	108060,7698
pile 13	Min	-2838,092	-6952,495	-2362,193	-86,6883	-42726,5173	-108060,77
pile 14	Max	15932,206	6908,598	2315,03	56,5327	41787,9792	107804,5983
pile 14	Min	-2807,069	-6908,598	-2315,03	-56,5327	-41787,9792	-107804,598
pile 15	Max	15952,228	6926,502	2443,84	53,0872	40672,5513	108571,5684
pile 15	Min	-2844,406	-6926,502	-2443,84	-53,0872	-40672,5513	-108571,568
pile 16	Max	15871,952	6969,715	2381,084	68,2599	39271,207	109831,5783
pile 16	Min	-2734,235	-6969,715	-2381,084	-68,2599	-39271,207	-109831,578
pile 17	Max	16174,203	6967,917	2243,952	78,2617	36972,8212	110246,4373
pile 17	Min	-2285,292	-6967,917	-2243,952	-78,2617	-36972,8212	-110246,437
pile 18	Max	17098,412	6842,063	2060,938	93,9438	34022,5935	108538,0318
pile 18	Min	-1873,822	-6842,063	-2060,938	-93,9438	-34022,5935	-108538,032
pile 19	Max	14564,26	6528,86	2170,894	99,4254	31762,0784	103569,8925
pile 19	Min	-930,004	-6528,86	-2170,894	-99,4254	-31762,0784	-103569,892
pile 20	Max	10408,86	6379,985	2435,301	81,3847	35718,2802	101052,9959
pile 20	Min	-461,274	-6379,985	-2435,301	-81,3847	-35718,2802	-101052,996
pile 21	Max	11962,56	6285,288	2578,136	62,3977	38561,6503	99749,2427
pile 21	Min	-638,521	-6285,288	-2578,136	-62,3977	-38561,6503	-99749,2427
pile 22	Max	10258,935	6293,415	2704,139	54,9207	41027,5088	100292,2453
pile 22	Min	-519,57	-6293,415	-2704,139	-54,9207	-41027,5088	-100292,245
pile 23	Max	14977,996	6351,531	2734,893	53,3365	42331,9329	102107,3823
pile 23	Min	-1256,103	-6351,531	-2734,893	-53,3365	-42331,9329	-102107,382
pile 24	Max	15752,267	6492,096	2635,627	71,3171	40735,0619	104902,3785
pile 24	Min	-1490,261	-6492,096	-2635,627	-71,3171	-40735,0619	-104902,379

pile 25	Max	13086,414	6509,145	2370,757	117,5724	35697,3673	105477,8168
pile 25	Min	-2187,612	-6509,145	-2370,757	-117,5724	-35697,3673	-105477,817
pile 26	Max	13266,995	6591,603	2272,092	150,204	33939,7869	106541,2376
pile 26	Min	-2271,421	-6591,603	-2272,092	-150,204	-33939,7869	-106541,238
pile 27	Max	15220,743	6664,189	2577,961	157,5293	40170,8359	107955,8211
pile 27	Min	-1471,915	-6664,189	-2577,961	-157,5293	-40170,8359	-107955,821
pile 28	Max	16935,23	6884,343	3267,053	110,3646	54642,1193	111340,6795
pile 28	Min	-1975,947	-6884,343	-3267,053	-110,3646	-54642,1193	-111340,68
pile 29	Max	16493,123	6940,414	3682,342	48,2367	63250,0333	111815,8585
pile 29	Min	-2440,064	-6940,414	-3682,342	-48,2367	-63250,0333	-111815,859
pile 30	Max	16805,422	6837,054	3611,424	95,9638	63493,1325	110019,8854
pile 30	Min	-2147,261	-6837,054	-3611,424	-95,9638	-63493,1325	-110019,885
pile 31	Max	14870,636	6460,2	3012,912	149,7653	40148,432	82875,8039
pile 31	Min	-1951,422	-6460,2	-3012,912	-149,7653	-40148,432	-82875,8039
pile 32	Max	13935,271	6300,305	2774,327	127,6799	37498,4962	81223,8049
pile 32	Min	-2716,379	-6300,305	-2774,327	-127,6799	-37498,4962	-81223,8049
pile 33	Max	14048,732	6297,853	2553,585	110,6456	34055,2413	78689,8598
pile 33	Min	-2827,77	-6297,853	-2553,585	-110,6456	-34055,2413	-78689,8598
pile 34	Max	14753,182	6312,67	2290,006	102,7907	30413,6574	80179,6102
pile 34	Min	-2438,657	-6312,67	-2290,006	-102,7907	-30413,6574	-80179,6102

Tableau des efforts agissant sur les piles creuses a L'ELA selon y

Appuis	Max/Min	N (kN)	H _{long}	H _{tras}	M _{torsion}	M _x	M _y
pile 1	Max	12570,573	1227,436	4664,348	195,2433	82873,6682	19618,6138
pile 1	Min	-459,872	-1227,436	-4664,348	-195,2433	-82873,6682	-19618,6138
pile 2	Max	12979,022	1226,16	5657,522	116,6878	100865,3169	19725,362
pile 2	Min	-459,235	-1226,16	-5657,522	-116,6878	-100865,317	-19725,362
pile 3	Max	13411,829	1253,463	5997,557	81,4513	106785,0038	20113,4421
pile 3	Min	-436,516	-1253,463	-5997,557	-81,4513	-106785,004	-20113,4421
pile 4	Max	12140,262	1279,193	5530,073	161,9255	98274,173	20189,6362
pile 4	Min	-236,19	-1279,193	-5530,073	-161,9255	-98274,173	-20189,6362
pile 5	Max	10171,287	1182,849	5139,347	200,8471	90576,5146	18719,4966
pile 5	Min	-97,904	-1182,849	-5139,347	-200,8471	-90576,5146	-18719,4966
pile 6	Max	9376,559	1241,205	4897,795	228,6129	86474,7709	18967,4797
pile 6	Min	-105,051	-1241,205	-4897,795	-228,6129	-86474,7709	-18967,4797
pile 7	Max	13865,58	1168,955	4901,965	243,7546	88402,0325	17706,7877
pile 7	Min	-278,877	-1168,955	-4901,965	-243,7546	-88402,0325	-17706,7877
pile 8	Max	16340,587	1054,038	5895,538	223,4482	106740,3004	16348,9388
pile 8	Min	-626,207	-1054,038	-5895,538	-223,4482	-106740,3	-16348,9388
pile 9	Max	15836,87	1457,229	6831,731	189,0772	123944,7365	22611,601
pile 9	Min	-770,471	-1457,229	-6831,731	-189,0772	-123944,737	-22611,601
pile 10	Max	15960,693	1624,971	7324,182	188,7202	132605,4057	26499,3827
pile 10	Min	-817,483	-1624,971	-7324,182	-188,7202	-132605,406	-26499,3827
pile 11	Max	15930,396	1977,041	7600,931	179,5666	137764,7443	32924,7721
pile 11	Min	-827,011	-1977,041	-7600,931	-179,5666	-137764,744	-32924,7721
pile 12	Max	15937,528	2422,82	7783,793	136,8954	141141,7008	40102,9656
pile 12	Min	-839,574	-2422,82	-7783,793	-136,8954	-141141,701	-40102,9656
pile 13	Max	15937,002	2660,44	7873,978	84,5506	142421,7244	43987,5565
pile 13	Min	-851,428	-2660,44	-7873,978	-84,5506	-142421,724	-43987,5565
pile 14	Max	15932,206	2426,202	7716,767	106,0748	139293,2641	41011,0219
pile 14	Min	-842,121	-2426,202	-7716,767	-106,0748	-139293,264	-41011,0219
pile 15	Max	15952,228	2137,148	7435,833	164,3028	133603,0598	35890,4286
pile 15	Min	-853,322	-2137,148	-7435,833	-164,3028	-133603,06	-35890,4286
pile 16	Max	15871,952	1852,308	7181,192	192,0002	127999,1269	29764,0815
pile 16	Min	-820,271	-1852,308	-7181,192	-192,0002	-127999,127	-29764,0815
pile 17	Max	16174,203	1510,69	6989,156	179,8594	123242,7372	23190,3709
pile 17	Min	-685,588	-1510,69	-6989,156	-179,8594	-123242,737	-23190,3709
pile 18	Max	17098,412	1681,011	6454,961	163,6509	113408,6451	24602,4308
pile 18	Min	-562,147	-1681,011	-6454,961	-163,6509	-113408,645	-24602,4308
pile 19	Max	14564,26	2024,641	5562,003	164,0583	96955,086	29339,6578
pile 19	Min	-279,001	-2024,641	-5562,003	-164,0583	-96955,086	-29339,6578
pile 20	Max	10408,86	2359,242	5261,521	142,3741	90411,1297	34841,2855
pile 20	Min	-138,382	-2359,242	-5261,521	-142,3741	-90411,1297	-34841,2855
pile 21	Max	11962,56	2673,201	5132,306	126,1719	88064,1036	40324,5943
pile 21	Min	-262,444	-2673,201	-5132,306	-126,1719	-88064,1036	-40324,5943
pile 22	Max	10258,935	2793,525	5253,359	120,5941	90480,5073	43454,4697
pile 22	Min	-287,482	-2793,525	-5253,359	-120,5941	-90480,5073	-43454,4697
pile 23	Max	14977,996	2967,906	5591,265	107,7178	96874,3345	47282,528
pile 23	Min	-376,831	-2967,906	-5591,265	-107,7178	-96874,3345	-47282,528
pile 24	Max	15752,267	3007,121	5941,461	89,6013	102841,9723	48152,4039
pile 24	Min	-447,078	-3007,121	-5941,461	-89,6013	-102841,972	-48152,4039

pile 25	Max	13086,414	2637,705	5820,49	164,1576	101098,2707	41287,4911
pile 25	Min	-656,284	-2637,705	-5820,49	-164,1576	-101098,271	-41287,4911
pile 26	Max	13266,995	2112,303	5727,04	231,6567	99138,2668	31314,0805
pile 26	Min	-681,426	-2112,303	-5727,04	-231,6567	-99138,2668	-31314,0805
pile 27	Max	15220,743	1972,262	5978,268	261,9965	103809,0194	29255,8786
pile 27	Min	-441,575	-1972,262	-5978,268	-261,9965	-103809,019	-29255,8786
pile 28	Max	16935,23	2444,389	6820,335	214,7602	120728,638	41212,7691
pile 28	Min	-592,784	-2444,389	-6820,335	-214,7602	-120728,638	-41212,7691
pile 29	Max	16493,123	3128,598	7656,96	101,0145	137294,112	54127,7382
pile 29	Min	-732,019	-3128,598	-7656,96	-101,0145	-137294,112	-54127,7382
pile 30	Max	16805,422	3234,163	7789,838	103,0042	145834,1911	57550,399
pile 30	Min	-644,178	-3234,163	-7789,838	-103,0042	-145834,191	-57550,399
pile 31	Max	14870,636	2680,301	7162,87	212,4481	99763,9951	35882,7426
pile 31	Min	-585,427	-2680,301	-7162,87	-212,4481	-99763,9951	-35882,7426
pile 32	Max	13935,271	2445,994	6354,338	214,7031	92764,7631	32552,8382
pile 32	Min	-814,914	-2445,994	-6354,338	-214,7031	-92764,7631	-32552,8382
pile 33	Max	14048,732	2058,87	5452,332	225,5679	79903,8806	26552,3553
pile 33	Min	-848,331	-2058,87	-5452,332	-225,5679	-79903,8806	-26552,3553
pile 34	Max	14753,182	1817,959	4372,53	239,0037	63418,4887	23102,0069
pile 34	Min	-731,597	-1817,959	-4372,53	-239,0037	-63418,4887	-23102,0069

Tableau des efforts agissant sur les piles creuses a L'ELA selon z

Appuis	Max/ Min	N (kN)	H _{long}	H _{tras}	M _{torsion}	M _x	M _y
pile 1	Max	12570,573	2107,964	1399,304	58,573	24862,1005	32079,4075
pile 1	Min	-974,717	-2107,964	-1399,304	-58,573	-24862,1005	-32079,4075
pile 2	Max	12979,022	2116,434	1697,257	43,9014	30259,5951	32177,1833
pile 2	Min	-5102,606	-2116,434	-1697,257	-43,9014	-30259,5951	-32177,1833
pile 3	Max	13411,829	2109,84	1799,267	24,4354	32035,5011	32091,2746
pile 3	Min	-4850,177	-2109,84	-1799,267	-24,4354	-32035,5011	-32091,2746
pile 4	Max	12140,262	2101,503	1659,022	68,401	29482,2519	32013,759
pile 4	Min	-1535,612	-2101,503	-1659,022	-68,401	-29482,2519	-32013,759
pile 5	Max	10171,287	2107,62	1541,804	60,2541	27172,9544	32107,8269
pile 5	Min	-617,137	-2107,62	-1541,804	-60,2541	-27172,9544	-32107,8269
pile 6	Max	9376,559	2110,031	1469,338	68,5839	25942,4313	32175,1556
pile 6	Min	-1167,232	-2110,031	-1469,338	-68,5839	-25942,4313	-32175,1556
pile 7	Max	13865,58	2116,099	1470,589	73,1264	26520,6097	32311,811
pile 7	Min	-3098,632	-2116,099	-1470,589	-73,1264	-26520,6097	-32311,811
pile 8	Max	16340,587	2139,248	1768,662	67,0345	32022,0901	32761,5229
pile 8	Min	-6957,859	-2139,248	-1768,662	-67,0345	-32022,0901	-32761,5229
pile 9	Max	15836,87	2140,984	2049,519	56,7232	37183,421	32971,2991
pile 9	Min	-8560,788	-2140,984	-2049,519	-56,7232	-37183,421	-32971,2991
pile 10	Max	15960,693	2142,812	2197,255	56,6161	39781,6217	33100,7284
pile 10	Min	-9083,147	-2142,812	-2197,255	-56,6161	-39781,6217	-33100,7284
pile 11	Max	15930,396	2137,875	2280,279	53,87	41329,4233	33057,9598
pile 11	Min	-9189,014	-2137,875	-2280,279	-53,87	-41329,4233	-33057,9598
pile 12	Max	15937,528	2105,487	2335,138	41,0686	42342,5102	32666,3237
pile 12	Min	-9328,595	-2105,487	-2335,138	-41,0686	-42342,5102	-32666,3237
pile 13	Max	15937,002	2085,749	2362,193	26,0065	42726,5173	32418,2309
pile 13	Min	-9460,307	-2085,749	-2362,193	-26,0065	-42726,5173	-32418,2309
pile 14	Max	15932,206	2072,58	2315,03	36,0118	41787,9792	32341,3795
pile 14	Min	-9356,897	-2072,58	-2315,03	-36,0118	-41787,9792	-32341,3795
pile 15	Max	15952,228	2077,951	2230,75	49,2908	40080,9179	32571,4705
pile 15	Min	-9481,352	-2077,951	-2230,75	-49,2908	-40080,9179	-32571,4705
pile 16	Max	15871,952	2090,915	2154,357	57,6001	38399,7381	32949,4735
pile 16	Min	-9114,117	-2090,915	-2154,357	-57,6001	-38399,7381	-32949,4735
pile 17	Max	16174,203	2090,375	2096,747	53,9578	36972,8212	33073,9312
pile 17	Min	-7617,641	-2090,375	-2096,747	-53,9578	-36972,8212	-33073,9312
pile 18	Max	17098,412	2052,619	1936,488	49,0953	34022,5935	32561,4095
pile 18	Min	-6246,073	-2052,619	-1936,488	-49,0953	-34022,5935	-32561,4095
pile 19	Max	14564,26	1958,658	1668,601	49,2175	29086,5258	31070,9677
pile 19	Min	-3100,013	-1958,658	-1668,601	-49,2175	-29086,5258	-31070,9677
pile 20	Max	10408,86	1913,996	1578,456	42,7122	27123,3389	30315,8988
pile 20	Min	-1537,579	-1913,996	-1578,456	-42,7122	-27123,3389	-30315,8988
pile 21	Max	11962,56	1885,586	1539,692	37,8516	26419,2311	29924,7728
pile 21	Min	-2128,404	-1885,586	-1539,692	-37,8516	-26419,2311	-29924,7728
pile 22	Max	10258,935	1888,025	1576,008	36,1782	27144,1522	30087,6736
pile 22	Min	-1731,9	-1888,025	-1576,008	-36,1782	-27144,1522	-30087,6736
pile 23	Max	14977,996	1905,459	1677,379	32,3153	29062,3003	30632,2147
pile 23	Min	-4187,01	-1905,459	-1677,379	-32,3153	-29062,3003	-30632,2147
pile 24	Max	15752,267	1947,629	1782,438	47,0537	30852,5917	31470,7136
pile 24	Min	-4967,536	-1947,629	-1782,438	-47,0537	-30852,5917	-31470,7136

pile 25	Max	13086,414	1952,744	1746,147	49,2473	30329,4812	31643,345
pile 25	Min	-7292,041	-1952,744	-1746,147	-49,2473	-30329,4812	-31643,345
pile 26	Max	13266,995	1977,481	1718,112	69,497	29741,48	31962,3713
pile 26	Min	-7571,403	-1977,481	-1718,112	-69,497	-29741,48	-31962,3713
pile 27	Max	15220,743	1999,257	1793,48	78,5989	31142,7058	32386,7463
pile 27	Min	-4906,385	-1999,257	-1793,48	-78,5989	-31142,7058	-32386,7463
pile 28	Max	16935,23	2065,303	2046,101	64,4281	36218,5914	33402,2039
pile 28	Min	-6586,491	-2065,303	-2046,101	-64,4281	-36218,5914	-33402,2039
pile 29	Max	16493,123	2082,124	2297,088	30,3044	41188,2336	33544,7576
pile 29	Min	-8133,548	-2082,124	-2297,088	-30,3044	-41188,2336	-33544,7576
pile 30	Max	16805,422	2051,116	2336,952	38,6251	43750,2573	33005,9656
pile 30	Min	-7157,537	-2051,116	-2336,952	-38,6251	-43750,2573	-33005,9656
pile 31	Max	14870,636	1938,06	2148,861	63,7344	29929,1985	24862,7412
pile 31	Min	-6504,741	-1938,06	-2148,861	-63,7344	-29929,1985	-24862,7412
pile 32	Max	13935,271	1890,092	1906,301	64,4109	27829,4289	24367,1415
pile 32	Min	-9054,596	-1890,092	-1906,301	-64,4109	-27829,4289	-24367,1415
pile 33	Max	14048,732	1889,356	1635,7	67,6704	23971,1642	23606,958
pile 33	Min	-9425,899	-1889,356	-1635,7	-67,6704	-23971,1642	-23606,958
pile 34	Max	14753,182	1893,801	1311,759	71,7011	19025,5466	24053,8831
pile 34	Min	-8128,857	-1893,801	-1311,759	-71,7011	-19025,5466	-24053,8831