République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المـــدرســـة الوطنيـــة العليـــا للأشغـال العموميـة

فرنسـيس جانســون

École Nationale Supérieure des Travaux Publics

Francis Jeanson

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Infrastructures de Base

Thème

Réalisation du tronçon Ksar El Boukhari- Boughezoul sur un linéaire de 40 Km de la nouvelle ligne BOUMEDFAA - DJELFA Etude et conception d'un viaduc ferroviaire du PK 03+000 au PK 03+465

Présenté par :

ROUABAH Lyna
SI BACHIR Lyna

Encadré par :

Mr SEBAH Omar

Promotion 2025 / 2026

© ENSTP-FJ – Garidi – Vieux Kouba

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

Remerciements

À l'issue de ce travail nous tenons à remercier du fond du cœur toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à sa réalisation.

Nous tenons, en premier lieu, à remercier notre encadrant, **M. SEBAH OMAR**, le directeur du bureau d'étude de SAPTA, pour sa disponibilité et son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier l'entreprise **SAPTA** pour nous avoir donné l'opportunité de réaliser notre stage de fin d'études dans un environnement aussi professionnel que chaleureux, ainsi qu'à tout son personnel pour leur collaboration et leur aide précieuse.

Nous remercions également le corps professionnel du département DIB, l'administration et tous les enseignants de L'ENSTP, la chef de département et le directeur des études **M.FEDGHOUCHE** pour leur rigueur et leur professionnalisme qui ont contribué à notre formation durant notre parcours universitaire.

Nous tenons à remercier particulièrement **M. SIOUANI TOUFIK**, **M. MOHAMMED DAHMANE** et **M. HENNA YOUCEF**, pour leurs remarques pertinentes, leur bienveillance, leurs nombreuses connaissances transmises et leurs encouragements qui ont enrichi ce mémoire.

Nous tenons à remercier du fond du cœur toutes celles et tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire

Dédicace

Ce travail est dédié à ...

Mes parents adorés, toujours présents et encourageants,
Maman, merci pour ton amour, ta patience et tous tes sacrifices.
Papa, merci pour tout ce que tu fais pour nous.
aucune parole ne sera jamais assez forte pour vous remercier.
Mon frère, qui rend toujours la vie plus légère et plus drôle.
Ma petite sœur, unique en son genre.
Mes grands-parents, pour tout l'amour, la sagesse et les souvenirs précieux que vous m'offrez chaque jour.
Mes oncles et ma tante -loin des yeux mais près du cœur- pour tous ce que vous avez fait pour moi.
Ines -mon miroir- et mimi avec qui j'ai tant partagé, aventures comme secrets.
toi qui partage mes petits et grands moments, même de loin, tu seras à jamais mon soleil.
Au groupe 03 pour tous les souvenirs.
Mon binôme de travail et de cœur.
Moi-même, pour chaque moment, chaque difficulté affrontée et chaque victoire silencieuse qui m'a conduite vers ce premier sommet, le premier d'une longue lignée.

Lyna Rouabah

Dédicace

Je remercie Allah pour ce que je suis, d'avoir veillé sur moi à chaque instant, dans les jours de joie comme dans les épreuves, merci pour les prières exaucées, les épreuves surmontées et les bénédictions que seul toi connaît.

Je dédie ce travail :

Aux deux personnes qui ont été là depuis le début, qui ont sacrifié leurs vies pour la mienne, qui ont été témoins et première raison de ma réussite,
A ma chère maman , la femme la plus merveilleuse et la plus courageuse, merci pour tout l'amour inconditionnel que tu m'as toujours donné,
A mon cher papa, ma fierté et mon premier amour, rien ne vaut ce que tu as fait pour moi le long de ma vie et spécialement ces cinq dernières années, merci à toi pour tout,
J'espère vous rendre fiers par cette première réussite

A mon frère Yanis, mon meilleur ami et mon partenaire de crime, je ne sais pas à quoi ressemblerait ma vie sans ta présence, merci pour ton amour et ton soutien et de n'avoir jamais douté de moi,

A Nora, ma soeur de coeur, tout est plus beau avec toi, merci d'être ma personne de confiance, merci pour tout ce que tu es pour moi,

A ma binôme et ma meilleure amie Lyna, celle avec qui tout a commencé, je suis très fière de partager cette réussite avec toi,

A ma chère yasmine, à tous nos moments de joies, de tristesses et à tous nos délires ensemble,

A celui qui croit toujours en moi et qui me comble d'amour, merci de faire de moi une personne meilleure,

A mes très chères copines, Mahdia, Yousra, Saoussen, Insaf, Sarra, Maria, et Anfel, la vie à l'école était beaucoup plus belle à vos côtés je vous aime toutes,

A toute ma famille du plus grand au plus petit, à ma grand mère Nora, qu'Allah la préserve, à la mémoire de ceux qui nous ont quitté : mon cher grand père Mohand Tayeb, ma grand mère Sekoura et mon grand père Mohamed Ameziane, qu'Allah leur accorde le paradis, j'espère que vous êtes fiers de moi de là où vous êtes,

Et enfin à la petite moi, la petite Lyna qui rêvait grand, qui espérait toujours mieux, et la moi d'aujourd'hui qui a tout surmonté comme une guerrière, je suis très fière de toi.

Lyna Si Bachir

Résumé

Ce travail fait partie d'un projet de fin d'études et traite la conception ainsi que l'étude d'un viaduc ferroviaire à double voie, situé au PK 3+000 de la nouvelle ligne BOUMEDFAA - DJELFA à travers le tronçon KSAR EL BOUKHARI - BOUGHEZOUL et long de 465 m.

Cette étude porte à la fois sur l'aspect conceptuel et sur le dimensionnement d'un tablier mixte isostatique bipoutre, choisi après plusieurs itérations et analyses comparatives de différentes variantes.

La solution ainsi adoptée a été ensuite contrôlée par une modélisation réalisée sous le logiciel MIDAS Civil, fondée sur la méthode des éléments finis.

En outre, les autres éléments de l'ouvrage, notamment les appareils d'appui, les piles et les fondations, ont été dimensionnés, calculés et vérifiés selon les normes algériennes et internationales en vigueur.

Mots-clés : Viaduc ferroviaire, pont-rail, bipoutre mixte, tablier mixte isostatique, poutre PRS.

Summary

This work is part of a final year project and deals with the design and analysis of a double-track railway viaduct, located at PK 3+000 of the new Boumedfaa - Djelfa line, crossing the Ksar El Boukhari - Boughezoul section and measuring 465 m in length.

This study focuses on both the conceptual design and the dimensioning of a two-girder, isostatic composite deck, chosen after several iterations and comparative analyses of different variants.

The adopted solution was then verified by modeling using MIDAS Civil software, based on the finite element method.

Furthermore, the other structural elements, including the bearings, piers, and foundations, were dimensioned, calculated, and verified according to applicable Algerian and international standards.

Keywords : Railway viaduct, railway bridge, two-girder composite, isostatic composite deck, PRS girder.

ملخص

يُعدّ هذا العمل جزءًا من مشروع التخرج، ويتناول تصميم وتحليل جسر سكة حديدية مزدوج المسار، يقع عند الكيلومتر 3+000 من خط بومدفع - الجلفة الجديد، ويعبر قسم قصر البخاري - بوغزول، ويبلغ طوله 465 مترًا

تركز هذه الدراسة على التصميم المفاهيمي وتحديد أبعاد جسر مختلط مكون من عارضتين، تم اختياره بعد عدة محاولات وتحليلات مقارنة لخيارات مختلفة

تم التحقق من صحة الحل المُعتمد من خلال نمذجة باستخدام برنامج ميداس سيفيل ، بالاعتماد على طريقة العناصر المحدودة

علاوة على ذلك، تم تحديد أبعاد العناصر الإنشائية الأخرى، بما في ذلك المحامل والأعمدة والأساسات، وحسابها والتحقق منها وفقًا للمعايير الجزائرية والدولية المعمول به

الكلمات المفتاحية : جسر سكة حديدية، مركب مزدوج، سطح مركب متساوي الضغط، عارضة PRS

SOMMAIRE

Introduction générale

CHAPITRE I : PRÉSENTATION DU PROJET
I.1- Introduction.... 1
I.2- Présentation du projet.... 1
I.3- Situation de l'ouvrage.... 1
I.4- L'obstacle à franchir.... 1
I.5- Données du projet.... 2
I.5.1- Les données fonctionnelles.... 2
I.5.2- Les données naturelles.... 3

CHAPITRE II : CONCEPTION ET PRÉDIMENSIONNEMENT
II.1- Introduction.... 6
II.2- Présentation des variantes.... 6
II.2.1- Variante 1 : Pont À Poutres Préfabriquées précontraintes Par Post-Tension (VIPP).... 6
II.2.2- Variante 2 : Pont voussoirs en béton précontraint construit par encorbellements successifs.. 9
II.2.3- Variante 3 : Pont Mixte (Acier - Béton) Bipoutres.... 13
II.3- Etude comparative des variantes.... 19

CHAPITRE III : CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX ET HYPOTHÈSES DE CALCUL
III.1- Introduction.... 21
III.2- Normes et règlements.... 21
III.3- Caractéristiques des matériaux.... 21
III.3.1- Béton.... 21
III.3.2- Aciers.... 25

CHAPITRE IV : ÉTUDE DES CHARGES ET SOLLICITATIONS
IV.1- Introduction.... 27
IV.2- Évaluation des actions et sollicitations.... 27
IV.2.1- Charges permanentes.... 27
IV.2.2- Charges permanentes complémentaires.... 29
IV.2.3- Surcharges d'exploitation.... 31
IV.3- Application des charges de trafic sur les ponts ferroviaires.... 43
IV.3.1- Principes généraux.... 43
IV.3.2- Groupes de charges - Valeurs caractéristiques de l'action multicomposante.... 43
IV.3.3- Combinaisons de charges.... 45

CHAPITRE V : CALCUL DU TABLIER MIXTE
V.1- Introduction.... 52
V.2- Présentation du logiciel MIDAS CIVIL 2022.... 52
V.3- Hypothèses de calcul.... 52
V.4- Propriétées de la section combinée.... 53
V.5- Vérification de la résistance des sections et de la sécurité structurelle (Eurocodes 3 et 4).... 63

V.6- Retrait du béton..... 74
V.7- Entretoises..... 78
V.8- Vérification de la flèche à L'ELS (EN 1990 Annexe A2, A.2.4.4.2.3)..... 80
V.9- Vérification de la stabilité au voilement des âmes..... 81
V.10- Vérification au déversement..... 83
V.11- Connecteurs..... 83
V.11.1- Définition..... 83
V.11.2- Flux de cisaillement..... 84
V.11.3- Vérifications des espacement vis-a-vis des dispositions constructives..... 89
V.12- Étude de la dalle..... 90
V.12.1- Dimensions de la dalle..... 90
V.12.2- Ferraillage de la dalle..... 91
V.13- Assemblages..... 94
V.13.1- Types d'assemblages..... 94
V.13.2- Catégories d'assemblages soudés..... 94
V.13.3- Soudage effectué..... 95
V.13.4- Contrôle des soudures..... 96

CHAPITRE VI : LES ÉQUIPEMENTS DE L'OUVRAGE
VI.1- Introduction..... 97
VI.2- Les appareils d'appuis..... 97
VI.3- Choix de l'appareil d'appui..... 97
VI.4- Le dimensionnement des appareils d'appuis..... 98
VI.4.1- Vis à vis des efforts verticaux..... 98
VI.4.2- Vis à vis des efforts horizontaux..... 101
VI.5- Dé d'appui..... 102
VI.6- Joint sous ballast..... 104
VI.7- Calcul du souffle..... 104
VI.8- Appareil de dilatation ferroviaire..... 107
VI.9- Système d'évacuation des eaux pluviales..... 107

CHAPITRE VII : ÉTUDE DE L'INFRASTRUCTURE
VII.1- Introduction..... 108
VII.2- Définition d'une étude sismique..... 108
VII.3- Classification de l'ouvrage..... 108
VII.4- Masses (RPOA 4.2.2)..... 109
VII.5- Raideurs des éléments (RPOA 4.2.3)..... 109
VII.6- Spectre de réponse..... 109
VII.6.1- Spectre de réponse horizontale (RPOA 3.2.1.1)..... 109
VII.6.2- Spectre de réponse verticale (RPOA 3.2.1.1)..... 111
VII.7- Analyse dynamique linéaire — Méthode du spectre de réponse (RPOA 4.3.2)..... 112
VII.8- Combinaison des réponses modales (RPOA 4.3.2.4)..... 112
VII.9- Combinaison des composantes de l'action sismique (RPOA 4.3.2.5)..... 113
VII.10- Combinaison des actions de calcul (RPOA 5.1)..... 113
VII.11- Étude des piles..... 114
VII.11.1- Conception..... 114
VII.11.2- Vérification de la stabilité au flambement..... 117

VII.12- Évaluation des sollicitations agissant sur la pile..... 118
VII.12.1- Sollicitation sismiques..... 118
VII.12.2- Combinaisons de charges..... 119
VII.13- Ferraillage de la pile..... 119
VII.14- Étude de la culée..... 125
VII.14.1- Conception..... 125
VII.14.2- Efforts de la poussée du sol..... 126
VII.14.3- Vérification de la stabilité de la culée C1 sous charges permanentes..... 127

CHAPITRE VIII : ÉTUDE DES FONDATIONS
VIII.1- Introduction..... 128
VIII.2- Analyse des résultats de l'étude géotechnique..... 128
VIII.3- Types de fondations choisies..... 128
VIII.4- Étude de fondations profondes sur pieux..... 129
VIII.4.1- Pré-dimensionnement des fondations..... 129
VIII.4.2- Procédure de calcul de la profondeur des pieux..... 129
VIII.5- Calcul des résistances (FASCICULE N° 62 - Titre V _ ANNEXE C.3.)..... 130
VIII.6- Ferraillage des pieux..... 137
VIII.6.1- Hypothèses..... 137
VIII.6.2- Dispositifs de construction (selon B.A.E.L. 91)..... 137
VIII.6.3- Ferraillage..... 137
VIII.7- Étude de la semelle..... 137

CHAPITRE IX : ANALYSE DYNAMIQUE
IX.1- Introduction..... 140
IX.2- Nécessité d'une analyse dynamique..... 140
IX.3- Charges et combinaisons de charges..... 143
IX.4- Caractéristiques de la section équivalente..... 146
IX.4.1- Dimensions du caisson équivalent..... 146
IX.4.2- Caractéristiques du caisson..... 148
IX.5- Modes significatifs..... 148
IX.6- Vérifications..... 149
IX.6.1- Vitesse critique..... 149
IX.6.2- Accélération du tablier..... 151
IX.6.3- Flèche verticale..... 154
IX.6.4- Coefficient dynamique..... 155
IX.6.5- Rotations aux sections d'about (sur appuis)..... 157

CONCLUSION GÉNÉRALE..... 158

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : PRÉSENTATION DU PROJET
Figure I.1 : Situation du projet (Google Earth)..... 1
Figure I.2 : Vue en plan du projet.....2
Figure I.3 : Profil en long du projet.....2
Figure I.4 : Profil en travers du projet..... 3
Figure I.5 : Carte de zonage sismique de l'Algérie.....4
Figure I.6 : Carte des bassins hydrographiques de l'Algérie..... 5

CHAPITRE II : CONCEPTION ET PRÉDIMENSIONNEMENT
Figure II.1 : Profil en long de la variante (01).....6
Figure II.2 : Section transversale de la variante (01).....8
Figure II.3 : Coupe transversale courante de la variante (1)..... 8
Figure II.4 : Coupe transversale de la pile.....9
Figure II.5 : Profil en long de la variante (02).....9
Figure II.6: Schéma d'un ouvrage hauteur constante..... 10
Figure II.7 : Schéma de la coupe transversale d'un voussoir a hauteur constante.....10
Figure II.8 : Dimensionnement du voussoir..... 11
Figure II.9 : Coupe transversale de la variante (2)..... 12
Figure II.10 : Coupe transversale de la pile.....13
Figure II.11 : Profil en long de la variante (03).....14
Figure II.12 : Dimensions des différentes sections métalliques..... 15
Figure II.13 : Distribution des sections au long de la poutre.....15
Figure II.14 : Types d'entretoisement.....15
Figure II.15 : Dimensionnement des différentes sections métalliques.....16
Figure II.16 : Distribution des sections au long de la poutre.....17
Figure II.17 : Coupe transversale type de la variante (3)..... 17
Figure II.18 : Coupe transversale de la pile.....18
Figure II.19 : Coupe latérale de la culée.....19
Figure II.20 : Coupe transversale de la culée..... 19

CHAPITRE IV : ÉTUDE DES CHARGES ET SOLLICITATIONS
Figure IV.1 : Evaluation des charges permanentes complémentaires.....31
Figure IV.2 : Modèle de charge 71 et valeurs caractéristiques des charges verticales..... 32
Figure IV.3 : Schéma caractéristique du modèle de charge SW/2.....33
Figure IV.4 : Schéma caractéristique du modèle de charge train à vide.....33
Figure IV.5 : Excentricité des charges verticales.....34
Figure IV.6 : Répartition longitudinale d'une force ponctuelle ou d'une charge de roue par le rail.....34
Figure IV.7 : Répartition longitudinale des charges par les traverses et le ballast..... 35
Figure IV.8 : Répartition longitudinale par le ballast des charges d'essieu du schéma de charge UIC 71..... 35
Figure IV.9 : Schéma propre à une voie ferrée avec courbure.....37
Figure IV.10 : Schéma montrant la situation de calcul 1.....41
Figure IV.11 : Schéma montrant la situation de calcul 2.....41

CHAPITRE V : CALCUL DU TABLIER MIXTE
Figure V.1 : Définition de la largeur efficace..... 54

Figure V.2 : Valeurs de bi..... 54
Figure V.3 : Calcul des portées équivalentes..... 55
Figure V.4 : La largeur efficace..... 57
Figure V.5 : La largeur efficace..... 58
Figure V.6 : Centre de gravité d'une section mixte..... 59
Figure V.7 : Coupe transversale de la paroi interne..... 64
Figure V.8 : Coupe transversale de la paroi externe..... 64
Figure V.9 : Distribution des contraintes dans la section transversale..... 67
Figure V.10 : Disposition des vérins hydrauliques..... 79
Figure V.11 : Réactions d'appuis 01..... 79
Figure V.12 : Réactions d'appuis 02..... 80
Figure V.13 : Disposition longitudinale des goujons du tablier 01..... 89
Figure V.14 : Disposition longitudinale des goujons du tablier 02..... 89
Figure V.15 : Disposition transversale des goujons..... 90
Figure V.16 : Disposition de la dalle..... 90
Figure V.17 : Cartographie du moment Myy+a L'ELU..... 92
Figure V.18 : Cartographie du moment Myy-a L'ELU..... 92
Figure V.20 : Cartographie du moment Myy+a L'ELS..... 93
Figure V.20 : Cartographie du moment Myy-a L'ELS..... 93
Figure V.18 : Cartographie du moment Myy à L'ELU en situation de déraillement..... 93
Figure V.17 : Détail de la soudure de l'âme..... 95
Figure V.18 : Détail de la soudure des semelles supérieures..... 95
Figure V.19 : Détail de la soudure des semelles inférieures..... 96

CHAPITRE VI : LES ÉQUIPEMENTS DE L'OUVRAGE

Figure VI.1 : Composition d'un appareil d'appui à pot..... 98
Figure VI.2 : Déplacement de la pile du tablier 01 sous ELA X..... 106
Figure VI.3 : Déplacement de la pile du tablier 02 sous ELA X..... 106
Figure VI.4 : Appareil de dilatation ferroviaire (ADF)..... 107

CHAPITRE VII : ÉTUDE DE L'INFRASTRUCTURE

Figure VII.1: Spectre de réponse horizontale..... 110
Figure VII.2 : Spectre de réponse verticale..... 112
Figure VII.3 : Coupe transversale de la pile type voile..... 116
Figure VII.4 : Coupe transversale de la pile type évidé -2-..... 116
Figure VII.5 : Coupe transversale de la pile type évidé -3-..... 117
Figure VII.6 : Section transversale de la pile représentative..... 120
Figure VII.7 : Abaques de Walther..... 122
Figure VII.8 : Plan de ferraillage de la pile..... 124
Figure VII.9 : Coupe latérale de la culée..... 126
Figure VII.10 : Coupe transversale de la culée..... 126

CHAPITRE VIII : ÉTUDE DES FONDATIONS

Figure VIII.1 : Coupe longitudinal du terrain..... 128
Figure VIII.2 : Les types de fondations..... 129
Figure VIII.3 : Schéma représentatif des résistances des pieux..... 130
Figure VIII.4 : Valeurs de Kp..... 132

Figure VIII.5 : Paramètres de calcul de Ple*.....133
Figure VIII.6 : Courbe de qs.....133
Figure VIII.7 : Choix du type d'abaque pour déterminer qs.....134

CHAPITRE IX : ANALYSE DYNAMIQUE

Figure IX.1 : Organigramme permettant de déterminer si une analyse dynamique est nécessaire.....141
Figure IX.2 : Limites de la fréquence propre n0 du pont en fonction de L.....142
Figure IX.3 : Flexion du tablier au Mode 1.....143
Figure IX-4 : HSLM-A.....144
Figure IX.5 : HSLM-A.....144
Figure IX.6 : Schéma de charge HSLM-A1.....144
Figure IX.7 : Schéma de charge HSLM-A2.....145
Figure IX.8 : Schéma de charge HSLM-A3.....145
Figure IX.9 : Schéma de charge HSLM-A4.....145
Figure IX.10 : Schéma de charge HSLM-A5.....145
Figure IX.11 : Schéma de charge HSLM-A6.....145
Figure IX.12 : Schéma de charge HSLM-A7.....146
Figure IX.13 : schéma de charge HSLM-A8.....146
Figure IX.14 : Schéma de charge HSLM-A9.....146
Figure IX.15 : Schéma de charge HSLM-A10.....146
Figure IX.16 : Caisson équivalent.....147
Figure IX.17 : Chargement d'un convoi sur une voie.....150
Figure IX.19 : Flèche admissible.....154
Figure IX.20 : Rotation maximale en fonction de la vitesse de franchissement.....157

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II : CONCEPTION ET PRÉDIMENSIONNEMENT
Tableau II.1 : Dimensionnement des poutres..... 7
Tableau II.2 : Dimensions de la pile..... 8
Tableau II.3 : Dimensionnement du voussoir..... 10
Tableau II.4 : Dimensions de la pile..... 12
Tableau II.5 : Épaisseurs des âmes et des semelles dans différentes sections..... 14
Tableau II.6 : Épaisseurs des âmes et des semelles dans différentes sections..... 16
Tableau II.7 : Conception de la pile..... 17
Tableau II.8 : Conception de la culée..... 18

CHAPITRE III : CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX ET HYPOTHÈSES DE CALCUL
Tableau III.1 : Caractéristiques du béton de l'ouvrage..... 22
Tableau III.2 : Contraintes admissibles..... 23
Tableau III.3 : Modules de déformation..... 24
Tableau III.4 : Contraintes limite de traction des aciers..... 25
Tableau III.5 : Limite d'élasticité fy en fonction de l'épaisseur des tôles..... 26
Tableau III.6 : Contraintes limites de rupture fu en fonction de l'épaisseur des tôles..... 26
Tableau III.7 : Coefficients partiels de sécurité sur les matériaux..... 26

CHAPITRE IV : ÉTUDE DES CHARGES ET SOLLICITATIONS
Tableau IV.1 : Charges permanentes du tablier (01)..... 27
Tableau IV.2 : Charges permanentes du tablier (02)..... 28
Tableau IV.3 : Valeurs des charges permanentes complémentaires..... 31
Tableau IV.4 : Valeurs à prendre pour le système SW/2..... 33
Tableau IV.5 : Gradient thermique $\Delta\theta$..... 42
Tableau IV.6 : Groupes de charges du trafic ferroviaire..... 44
Tableau IV.7 : Moment sollicitant chaque section durant les différentes phases de constructions..... 46
Tableau IV.8 : Effort tranchant sollicitant chaque section durant les différentes phases de constructions..... 47
Tableau IV.9 : Moment sollicitant chaque section durant les différentes phases de constructions..... 48
Tableau IV.10 : Effort tranchant sollicitant chaque section durant les différentes phases de constructions..... 50

CHAPITRE V : CALCUL DU TABLIER MIXTE
Tableau V.1 : Les valeurs de coefficient d'équivalence..... 53
Tableau V.2 : Calcul de la largeur efficace sur appuis du tablier 01..... 55
Tableau V.3 : Calcul de la largeur efficace à mi-travée du tablier 01..... 56
Tableau V.4 : Calcul de la largeur efficace sur appuis du tablier 02..... 57
Tableau V.5 : Calcul de la largeur efficace à mi-travée du tablier 02..... 58
Tableau V.6 : Caractéristique de la section métallique..... 60
Tableau V.7 : Caractéristique de la section métallique..... 60
Tableau V.8 : Caractéristique de la section métallique..... 61
Tableau V.9 : Caractéristique de la section métallique..... 61
Tableau V.10 : Caractéristique de la section métallique..... 62
Tableau V.11 : Caractéristique de la section métallique..... 62
Tableau V.12 : Caractéristique de la section métallique..... 62
Tableau V.13 : Caractéristique de la section métallique..... 63

Tableau V.14 : Classification des sections....65
Tableau V.15 : Valeurs du coefficient....65
Tableau V.16 : Classification des sections....66
Tableau V.17 : Limite d'élasticité fy en fonction de l'épaisseur des tôles....66
Tableau V.18 : Contrainte admissible de chaque section....67
Tableau V.19 : Valeurs de l'aire de cisaillement....68
Tableau V.20 : Vérifications et résultats 1.1....69
Tableau V.21 : Vérifications et résultats 1.2....70
Tableau V.22 : Vérifications et résultats 2.1....70
Tableau V.23 : Vérifications et résultats 2.2....71
Tableau V.24 : Vérifications et résultats 3.1....72
Tableau V.25 : Vérifications et résultats 3.2....72
Tableau V.26 : Vérifications et résultats 4.1....73
Tableau V.27 : Vérifications et résultats 4.2....74
Tableau V.28 : Variation de kh en fonction de h0....76
Tableau V.29 : Flux de cisaillement et disposition des goujons 1.1....85
Tableau V.30 : Flux de cisaillement et disposition des goujons 1.2....86
Tableau V.31 : Flux de cisaillement et disposition des goujons 2.1....87
Tableau V.32 : Flux de cisaillement et disposition des goujons 2.2....88
Tableau V.33 : Vérification de la condition dans le sens longitudinal....89
Tableau V.34 : Classification du sens de travail de la dalle....91
Tableau V.35 : Ferraillage de la dalle centrale....93
Tableau V.36 : Ferraillage de la dalle en en porte-à-faux....94

CHAPITRE VI : LES ÉQUIPEMENTS DE L'OUVRAGE

Tableau VI.1 : Coefficient α selon le guide SETRA....101
Tableau VI.2 : Dimensions du dé d'appui....102

CHAPITRE VII : ÉTUDE DE L'INFRASTRUCTURE

Tableau VII.1 : Classification des ponts....106
Tableau VII.2 : Coefficient d'accélération de zone A....107
Tableau VII.3 : Valeurs de T1 et T2....108
Tableau VII.4 : Valeurs de T1 et T2....109
Tableau VII.5 : Combinaisons de charge à l'état limite accidentelle....112
Tableau VII.6 : Implantation des piles de l'ouvrage....112
Tableau VII.7 : Classification des types de piles....113
Tableau VII.8 : Vérification du flambement mécanique....116
Tableau VII.9 : Efforts dus au séisme à la base de la pile....116
Tableau VII.10 : Efforts à la base de la pile à L'ELS....117
Tableau VII.11: Efforts à la base de la pile à L'ELU....117
Tableau VII.12: Calcul des paramètres d'orientation de la section....119
Tableau VII.13 : Calcul des efforts....119
Tableau VII.14: Ferraillage de la pile....120
Tableau VII.15 : ferraillage de la pile....121
Tableau VII.16 : Implantation des culées....123
Tableau VII.17 : Dimensionnement de la culée....123
Tableau VII.18 : Descente de charge de la culée....125

Tableau VII.19 : Poussée des terres.....125

CHAPITRE VIII : ÉTUDE DES FONDATIONS

Tableau VIII.1 : Essais sur chaque fondation.....128
Tableau VIII.2 : Sollicitations à la base de la semelle.....134
Tableau VIII.3 : Résistance des groupes de pieux selon la profondeur choisie.....134
Tableau VIII.4 : Résistances admissibles aux états limites.....134
Tableau VIII.6 : Dimensions de la semelle.....135

CHAPITRE IX : ANALYSE DYNAMIQUE

Tableau IX.1 : Caractéristiques de la poutre réelle.....146
Tableau IX.2 : Caractéristiques du caisson équivalent.....146
Tableau IX.3 : Caractéristiques des différent modes.....146
Tableau IX.4 : Participation massique modale.....147
Tableau IX.5 : Valeurs d'amortissement à prendre en compte pour le calcul.....147
Tableau IX.6 : Vitesse critique de chaque convoi.....148
Tableau IX.7 : Vérification de l'accélération maximale pour chaque vitesse.....150
Tableau IX.8 : Vérification de l'accélération maximale pour chaque vitesse critique.....151
Tableau IX.9 : Flèches verticales.....152
Tableau IX.10 : Coefficient de majoration dynamique '.....153
Tableau IX.11 : Moments max correspondant aux différentes vitesses.....154

LISTE DES ABREVIATIONS

SETRA : Service d'études techniques des routes et autoroutes.
CCP : Complément des charges permanentes.
BAEL : Béton armé aux États limites.
σ_S : Contrainte dans la fibre supérieure la plus éloignée du centre de gravité de la section.
σ_I : Contrainte dans la fibre inférieure la plus éloignée du centre de gravité de la section.
σ_{bc} : Contrainte de compression admissible.
σ_{bt} : Contrainte de traction admissible.
HA : Haute adhérence.
S_t : Espacement des armatures.
B : Aire d'une section de béton.
Es : Module de Young de l'acier.
Eij : Module de Young instantané à l'âge de j jours.
Evj : Module de Young différé à l'âge de j jours.
σ_{st} : La contrainte de calcul des aciers.
σ_{bc} : La contrainte de calcul de béton.
μ_U **:** Moment résistant réduit
I : Moment d'inertie de la section.
b_{eff} : Largeur efficace
M_{ser} : Moment fléchissant de calcul de service.
M_u : Moment fléchissant de calcul ultime.
N_{ser} : Effort normal de calcul de service.
N_u : Effort normal de calcul ultime.
G : Action permanente.
Q : Action d'exploitation.
V_u : Effort tranchant de calcul ultime.
W : Résultante des actions du vent.
f_e : Limite d'élasticité de l'acier.
f_{cj} : Résistance caractéristique à la compression du béton à l'âge de j jours.
f_{tj} : Résistance caractéristique à la traction du béton à l'âge de j jours.
f_{bu} : résistance de béton utile
f_u : Résistance à la rupture de l'acier en traction
f_y : Limite d'élasticité de l'acier
F_L : Force sismique longitudinale.
F_T : Force sismique transversale.
F_v : Force sismique vertical
g : Accélération de pesanteur
ε_{st} **:** déformation d'acier.
ε_{bc} **:** déformation de béton.
V_{Ed} : valeur de calcule du moment fléchissant**.**
$V_{Pl,Rd}$: le moment résistant de calcul au déversement.
A_V : aire de cisaillement.
f_y : moment résistance élastique de section brute.
p : Charge permanente unitaire.
h : Hauteur d'une poutre.

A_s : section des aciers tendus.
L_f : Longueur de flambement.
n : Coefficient d'équivalence acier-béton.
d : hauteur utile de la section en flexion simple.
y_1 : Profondeur de l'axe neutre calculée à l'ELS.
y_u : Profondeur de l'axe neutre calculée à l'ELU.
z : Bras de levier du couple de flexion.
γ_s : Coefficient partiel de sécurité sur l'acier.
γ_b : Coefficient partiel de sécurité sur le béton.

Introduction générale

Au sein du progrès en constante évolution des infrastructures de transport suscité par une demande croissante en mobilité, les ouvrages d'art constituent des structures essentielles pour garantir la continuité et la fluidité de la circulation. Les ponts, en particulier, sont des solutions techniques pour franchir des obstacles naturels ou artificiels (tels que les vallées, les oueds, les routes et les voies ferrées.)

La conception et l'étude d'un ouvrage d'art constituent un défi technique majeur, en raison des innombrables contraintes à prendre en considération. Il s'agit, d'une part, de garantir la résistance et la stabilité de la structure face aux différentes sollicitations,et, d'autre part, d'assurer sa durabilité et son optimisation économique . L'ingénieur doit donc s'appuyer sur des normes et règlements vigoureux.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire de fin d'études, qui porte sur la conception et l'étude d'un pont ferroviaire isostatique, implanté au PK 03+000

Dans la région de Ksar El Boukhari située dans la wilaya de Médéa ce travail consiste à examiner les variantes possibles et sélectionner la solution la plus adaptée selon des critères techniques et économiques, cette variante choisie sera dimensionnée de manière détaillée , depuis le tablier jusqu'aux fondations.

L'étude est menée en suivant une démarche méthodique, intégrant la définition des hypothèses de calcul, l'évaluation des charges et sollicitations, ainsi que l'utilisation d'outils de modélisation permettant d'obtenir des résultats précis et fiables et surtout la conformes avec les exigences réglementaires (SETRA, EUROCODE..)

Pour mener à bien ce travail, le mémoire est structuré comme suit :

• Chapitre I : Présentation du projet

• Chapitre II : Conception et prédimensionnement.

• Chapitre III : Caractéristiques des matériaux et hypothèses de calcul

• Chapitre IV : Etudes des charges et sollicitations

• Chapitre V : Calcul du tablier mixte

• Chapitre VI : Les équipements de l'ouvrage

• Chapitre VII : Etude de l'infrastructure

• Chapitre VIII : Etude des fondations

• Chapitre IX : Analyse dynamique

CHAPITRE I : PRÉSENTATION DU PROJET

I.1- Introduction

Pour les projets ferroviaires, les études de faisabilité des ponts rails et des voies qui y sont associées sont le résultat d'un travail coordonné entre les responsables du tracé et les concepteurs d'ouvrages d'art. Cette collaboration assure une bonne intégration entre la structure et les exigences de l'exploitation ferroviaire.

Les études préliminaires sont ensuite approfondies par des études détaillées permettant d'affiner la conception du pont rail en fonction des caractéristiques géométriques et géotechniques du site, ainsi que des différentes contraintes techniques, fonctionnelles et de sécurité liées au franchissement ferroviaire.

I.2- Présentation du projet

Ce mémoire porte sur la conception et l'étude du viaduc ferroviaire reliant le PK 03+000 au PK 03+465, qui s'inscrit dans le projet de la nouvelle ligne ferroviaire Boumedfaa - Djelfa, le tronçon Boughezoul - Djelfa est déjà opérationnel, tandis que les travaux se poursuivent sur les portions vers le nord, notamment entre Ksar El Boukhari et Boughezoul sur un linéaire de 40 Km, là où se situe notre ouvrage.
Cet ouvrage a été conçu pour répondre à des contraintes spécifiques liées à la topographie du site, tout en garantissant la continuité du tracé ferroviaire.

I.3- Situation de l'ouvrage

Le viaduc étudié s'implante au PK 03+000 au PK 03+465, à la commune de Ksar El Boukhari dans la wilaya de Médéa.

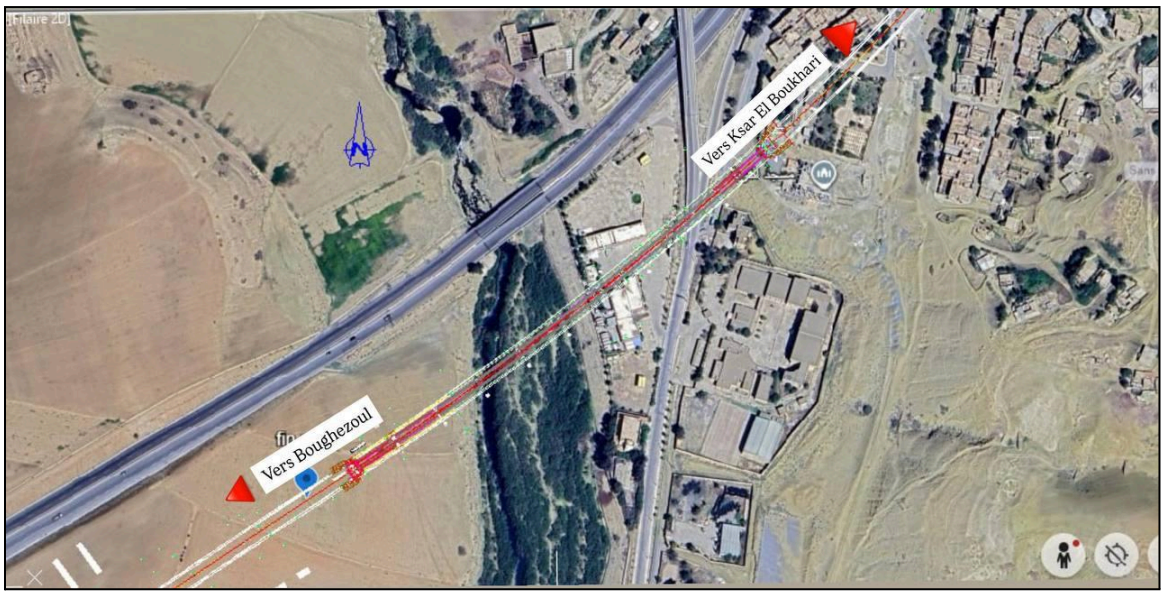


Figure I.1 : Situation du projet (Google Earth)

I.4- L'obstacle à franchir

L'ouvrage permettra de franchir une zone vallonnée comportant un cours d'eau de Oued Chelif au PK 03+300 et une route entre PK 03+050 et PK 03+100.

I.5- Données du projet

I.5.1- Les données fonctionnelles

Les données fonctionnelles d'un ouvrage d'art rassemblent l'ensemble des paramètres géométriques indispensables à sa représentation dans l'espace. Elles incluent notamment le tracé en plan, qui correspond à la vue en projection horizontale illustrant l'implantation et le parcours de l'ouvrage, le profil en long, qui décrit la vue longitudinale en mettant en évidence les altitudes et les pentes, ainsi que le profil en travers, qui constitue une coupe perpendiculaire à l'axe de l'ouvrage et précise sa largeur ainsi que l'organisation de ses différents éléments structurels.

Tracé en plan :

La longueur totale de l'ouvrage est de 465 mètres. Le pont sera situé au point kilométrique PK 03+000 jusqu'à PK 03+465.

- Du PK 03+000 au PK 03+356.219 : Arc de rayon R=2700 m et de longueur L= 356.219 m.
- Du PK 03+356.219 au PK 03+465 : Clothoïde de paramètre A= -666.552 et L=118.781 m.

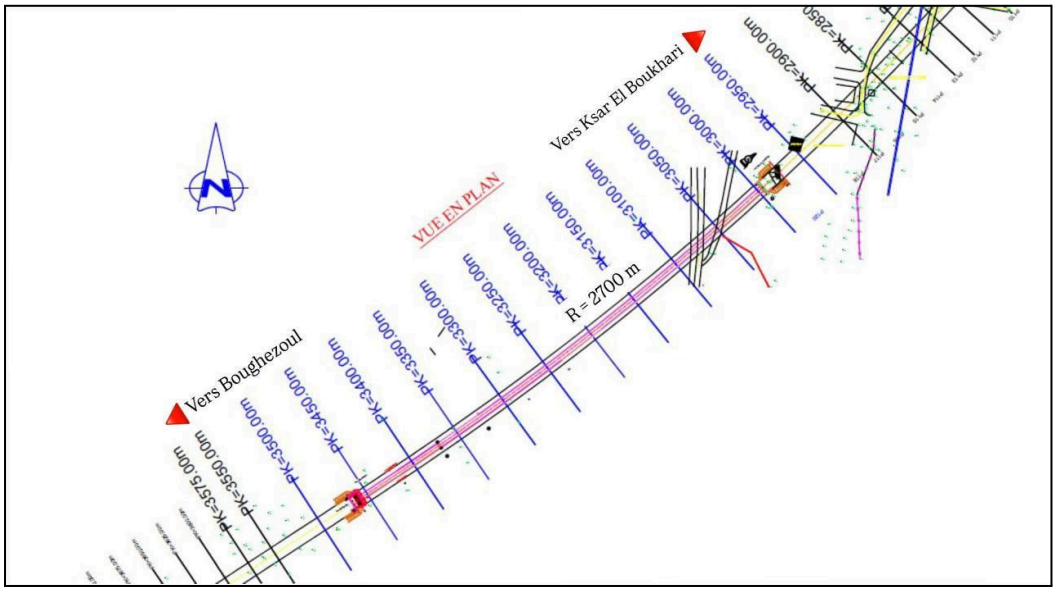


Figure I.2 : Vue en plan du projet

Profil en long :

Le profil en long représente la coupe longitudinale de l'ouvrage, montrant son élévation par rapport au niveau du sol. Dans notre cas, l'ouvrage commence au PK 03+000 et se termine au PK 03+465, avec une pente longitudinale de 0.7 %.

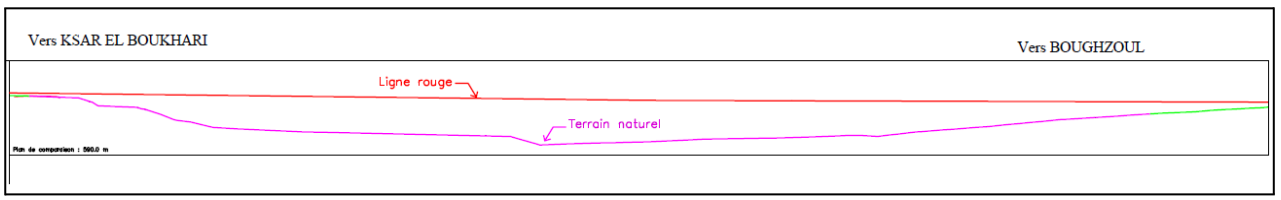


Figure I.3 : Profil en long du projet

Profil en travers :

Le profil en travers regroupe l'ensemble des éléments qui caractérisent la géométrie et les équipements de la voie dans le sens transversal. Sa conception doit faire l'objet d'une attention particulière, car toute modification ultérieure s'avère complexe si elle n'a pas été anticipée dès le départ. Il se distingue par les caractéristiques suivantes :

➢ Largeur totale : 13.6 m
➢ Nombre de voies : 2
➢ Écartement des rails : 1.5 m
➢ Distance entre les deux voies : 4.2 m
➢ Tablier en toit ± 4 % de part et d'autre de l'axe du pont.
➢ Traverses monoblocs.
➢ Système évacuation d'eau.

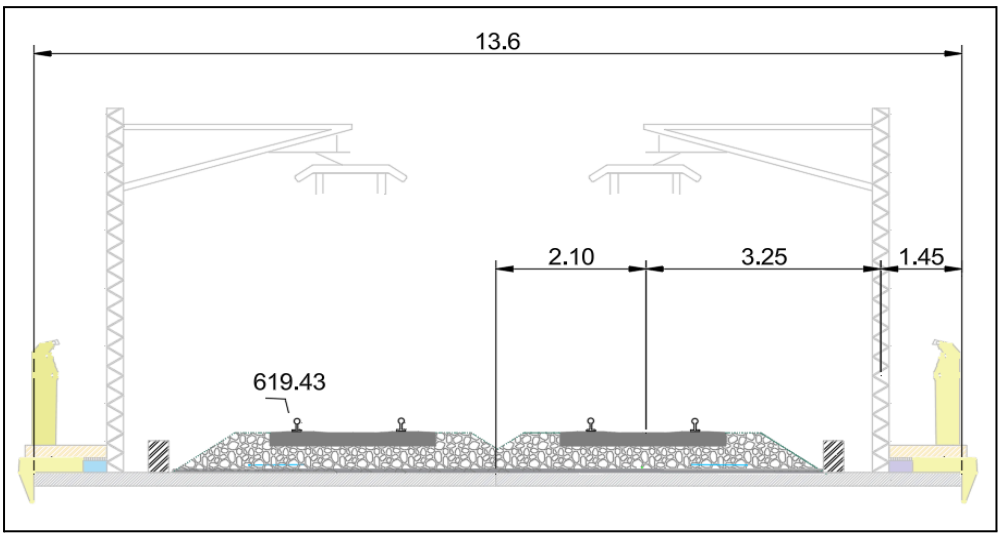


Figure I.4 : Profil en travers du projet

I.5.2- Les données naturelles

Topographie :

D'après le levé topographique et la visite du site effectuée permet de dire que le projet est implanté dans une zone vallonnée.

Géotechnique :

Les investigations géotechniques, qu'elles soient in situ ou en laboratoire, sont essentielles pour tout projet de génie civil. Elles permettent une description précise des terrains et une estimation de leurs propriétés physiques et mécaniques, nécessaires aux calculs.

- **Les essais in situ** : La campagne de reconnaissance géotechnique in situ a consisté en la réalisation de sondages carottés de 30m de profondeur, avec essais SPT et pose de piézomètres, et sondages pressiométriques.
- **Les essais de laboratoires** : Les échantillons récupérés lors des sondages carottés, ont été soumis aux différents essais de laboratoire suivants :
  - **Essais physiques** : Détermination de la teneur en eau et la densité, Analyse granulométrique par tamisage, Limites d'Atterberg.
  - **Essais mécaniques** : Essais de cisaillement à la boîte de Casagrande, Essais de compressibilité à l'oedomètre avec mesure de Cv.

- **Essais chimiques** : Analyse chimique du sol : Sulfates, Chlorures, Carbonates, Anhydride Carbonique, et Analyse chimique d'eau : Chlorures, Sulfates, Potentiel Hydrogène, Sels solubles.

Sismicité du site :

Le Règlement Parasismique Algérien des Ouvrages d'Art (R.P.O.A 2008) a établi des règles, qui sont fonctions de l'intensité de l'action sismique d'une région, pour tenir compte de la probabilité d'occurrence d'un séisme dans une région d'étude. Ces règles divisent le territoire algérien en cinq (05) zones sismiques : - Zone 0 : sismicité négligeable

- Zone I : sismicité faible
- Zone IIa : sismicité moyenne
- Zone IIb : sismicité élevée
- Zone III : sismicité très élevée

⇒ Le projet se situe dans une zone de sismicité moyenne (Zone IIa) Wilaya de MÉDÉA.

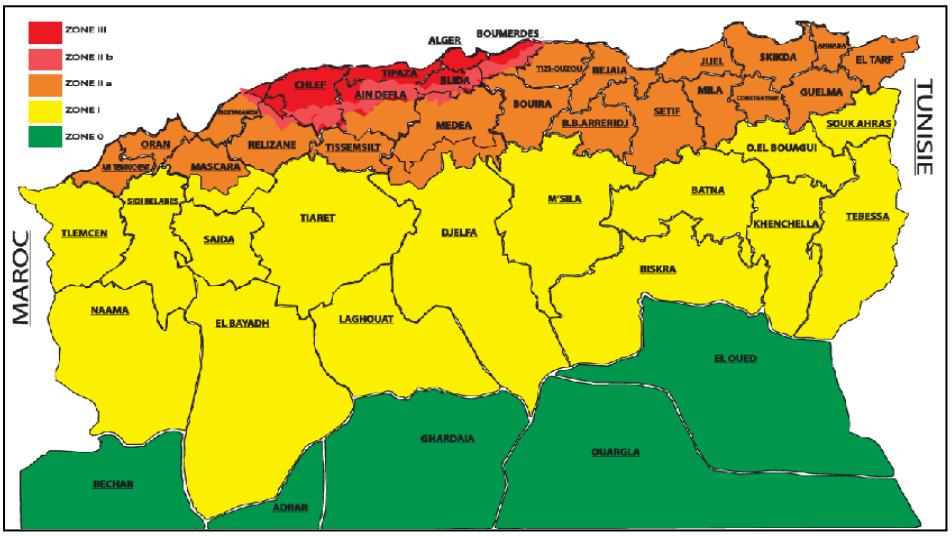


Figure I.5 : Carte de zonage sismique de l'Algérie

Pluviométrie

La zone de Ksar El Boukhari dans la wilaya de Médéa, est située à une altitude d'environ 600 m, elle enregistre des précipitations annuelles moyennes entre 300 et 500mm, majoritairement concentrées entre l'automne et le printemps. Les précipitations journalières maximales annuelles de fréquence décennale varient entre 50 et 60 m.

Température :

À Ksar El Boukhari (sud de Médéa), le climat est de type semi-aride, caractérisé par des étés très chauds et secs et des hivers frais à froids. Les températures varient fortement, pouvant aller de gelées en hiver à plus de 35°C - 40°C en été.

Hydrologie :

Du point de vue hydrologique, le projet de la Ligne ferroviaire, Tronçon Ksar El Boukhari - Boughezoul traverse la partie du grand bassin versant de Oued Chelif

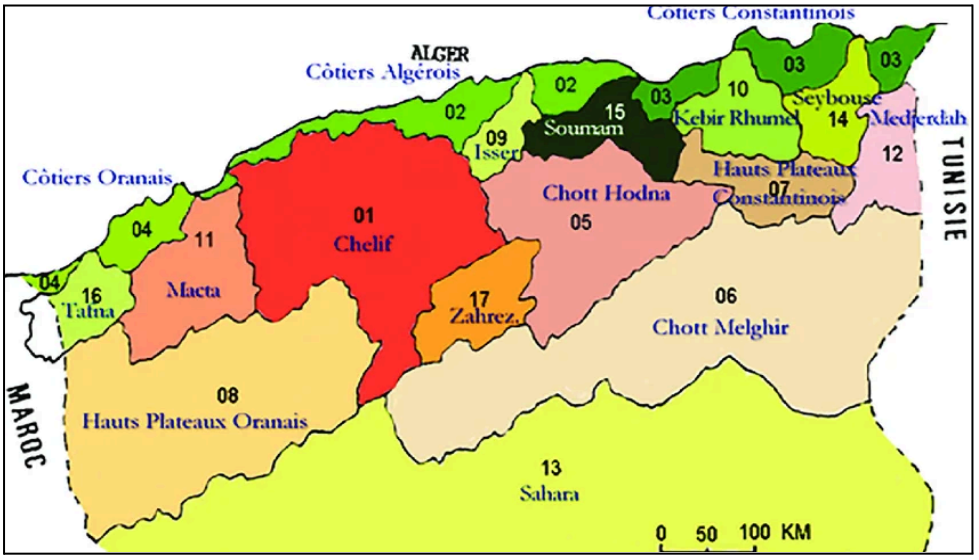


Figure I.6 : Carte des bassins hydrographiques de l'Algérie

CHAPITRE II : CONCEPTION ET PRÉDIMENSIONNEMENT

II.1- Introduction

Dans le cadre de l'étude de ce projet, plusieurs solutions structurelles ont été envisagées pour répondre aux exigences techniques et économique, la sélection a abouti à trois (03) variantes, auxquelles une étude complète sera menée suivie d'une analyse comparative afin de fournir une base solide pour le choix final de la solution la plus adaptée au projet.

- Variante 1: Pont à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension (VIPP)
- Variante 2 : Pont voussoirs en béton précontraint construit par encorbellements successifs
- Variante 3 : Pont mixte (acier-béton) bipoutre

II.2- Présentation des variantes

II.2.1- Variante 1 : Pont À Poutres Préfabriquées précontraintes Par Post-Tension (VIPP)

• Présentation de la variante

Les ponts VIPP sont des ouvrages en béton formés de poutres préfabriquées précontraintes par post-tension, généralement mises en œuvre sur chantier. Ils appartiennent à la famille des ponts à poutres sous chaussée et se caractérisent par une conception relativement simple, tout en nécessitant le respect des règles techniques et esthétiques.

Ils sont proches des ponts de type PRAD, mais s'en distinguent par la méthode de précontrainte : la post-tension pour les VIPP, contre la pré-tension réalisée en usine pour les PRAD. Utilisés principalement pour des portées moyennes, ces ponts sont constitués de travées indépendantes et ont marqué les premières applications de la précontrainte dans le domaine des ponts.

• Implantation des appuis

Les ponts à poutres précontraintes par post-tension (VIPP), sont employés pour des portées comprises entre 30 et 50 mètres. On choisit d'opter pour une variante composée de 11 travées dont 10 travées principales de 40m et deux travées de rive de 32.5m.

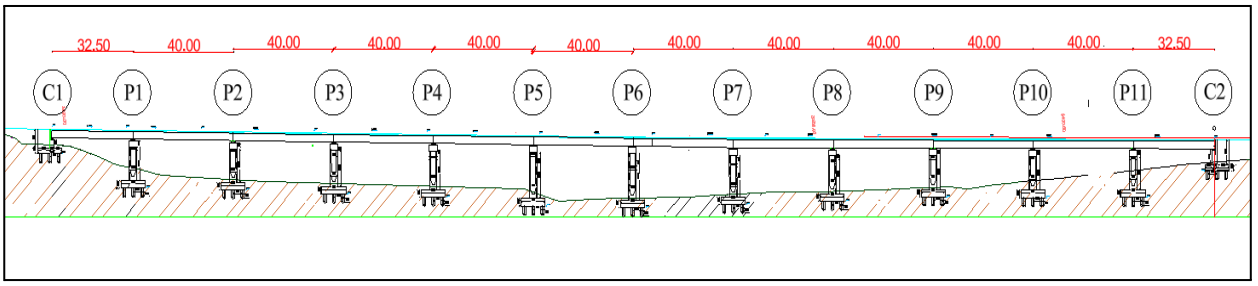
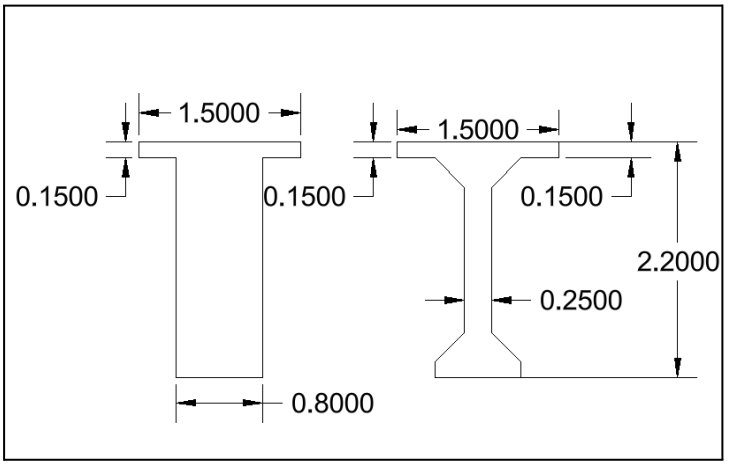


Figure II.1 : Profil en long de la variante (01)

- **Prédimensionnement transversale de la variante:**

Tableau II.1 : Dimensionnement des poutres

Elément	Procédé	Valeur adoptée
Épaisseur de la dalle (m)	$0.2 \leq e \leq 0.3$	0,25
Entraxe entre les poutres (m)	$1.50 < \lambda < 2.50$	1.5
Nombre de poutres	$N = La/\lambda = 9.06$	9
Longueur totale de la poutre (m)	-	40 (32.5 aux rives)
Hauteur de la poutre (m)	$L/20 < h_t < L/17$ $h_t = h_p + h_{hourdis}$	$H_{hourdis} = 0.02$ $H_p = 2.18$ $H_t = 2.2$
La largeur de la table de compression (m)	$b \geq 0,6 \times h_p$	1.5
Épaisseur de la table de compression (m)	$0,12 \leq e1 \leq 0,15$	0.15
La largeur du talon (m)	$0,6 \leq bt \leq 0,9$	0.8
L'épaisseur du talon (m)	$0,1 \leq et \leq 0,20$	0,2
Épaisseur b_0 de l'âme (m)	à mi-travée $b0 \geq 3Ø$gaine d	0.25
	Section d'about $b0 \geq 30$ cm avec une surface suffisante pour les plaques d'ancrage	0.80



(1) section d'about (2) section intermédiaire

Figure II.2 : Section transversale de la variante (01)

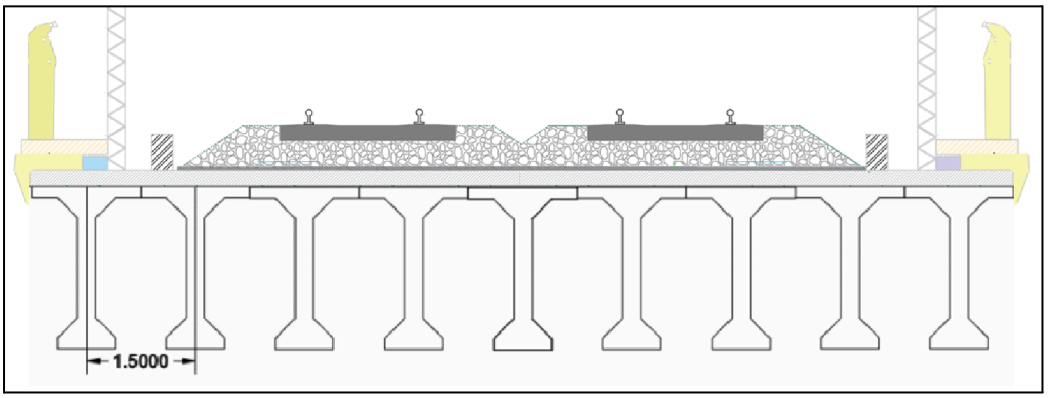


Figure II.3 : Coupe transversale courante de la variante (1)

- **Conception de l'infrastructure**
  - **Conception de la pile**

Tableau II.2 : Dimensions de la pile

Élément	Valeur
Hauteur (m)	variable
Diamètre du fût (m)	2.3
Nombre de fût	3
Entraxe des fûts (m)	3.8
Largeur du chevêtre (m)	13.6
Hauteur du chevêtre (m)	2
Type de fondation (m)	profonde avec pieux de diamètre 1.2
Semelle (m× m× m)	16.8 x 13.6 x 2.5

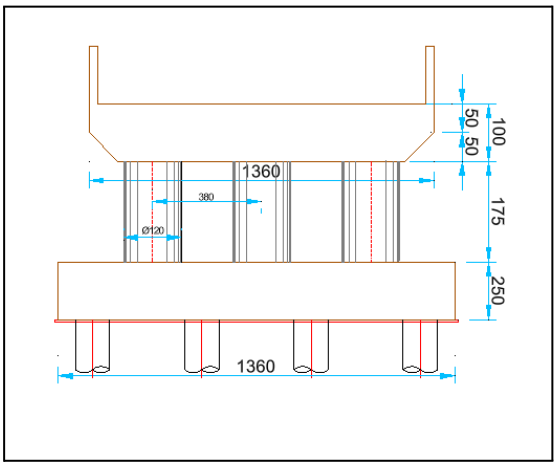


Figure II.4 : Coupe transversale de la pile

II.2.2- Variante 2 : Pont voussoirs en béton précontraint construit par encorbellements successifs

• Présentation de la variante

Le pont à voussoirs en béton précontraint construit par encorbellements successifs est réalisé en coulant progressivement le tablier de chaque côté des appuis, sans besoin d'échafaudages au sol. Chaque voussoir est précontraint pour garantir la résistance et la rigidité de l'ensemble. Cette technique permet de construire des ponts adaptés aux sites difficiles d'accès, tout en assurant une bonne continuité structurale et un contrôle précis de la qualité. Elle est particulièrement utilisée pour des portées moyennes à longues, offrant à la fois solidité et esthétisme.

• Implantation des appuis

Pour cette variante, nous proposons une coupe longitudinale composée de 6 travées principales de 63 m et de deux travées de rives de 43.5 m (d'après l'article 2.2.1 du guide de conception de SETRA 2003 il est plus courant que les travées de rive aient une portée mesurant 60 à 70 pour cent des portées principales.) , ce qui s'additionne en une longueur d'ouvrage totale de 465m.

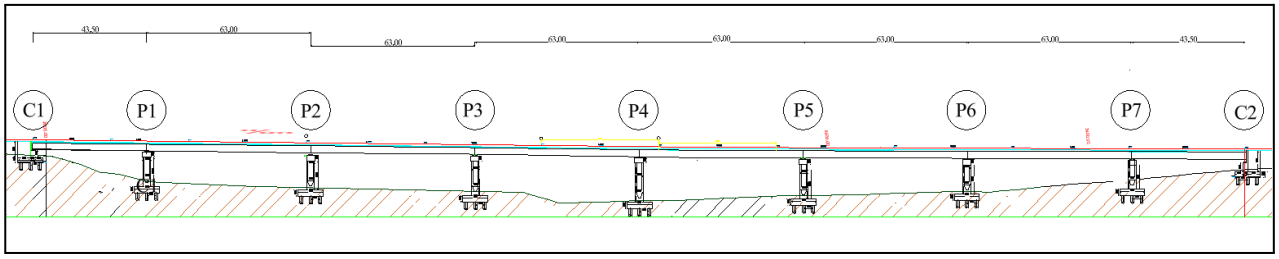


Figure II.5 : Profil en long de la variante (02)

D'après l'article 2.2.2.1 du guide de conception de SETRA 2003 Lorsque les portées principales d'un ouvrage sont inférieures à 65/70 m, le tablier le plus économique est en général de hauteur constante.

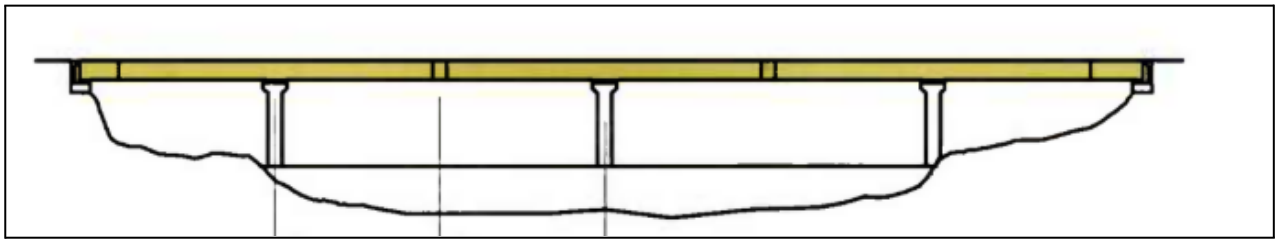


Figure II.6: Schéma d'un ouvrage hauteur constante

• Prédimensionnement transversale de la variante

Pour des largeurs de tablier inférieures à 20 m, la solution la plus économique est presque toujours constituée par un caisson à deux âmes, avec deux hourdis en dalle pleine, On adopte des voussoirs à hauteur variable, afin d'optimiser le comportement structurel de l'ouvrage en s'adaptant à la répartition des efforts le long de la portée, tout en assurant une meilleure efficacité en termes de résistance et d'économie de matériaux.
Dans le cas de notre étude la structure du prédimensionnement est montrée dans la figure présentée en dessous

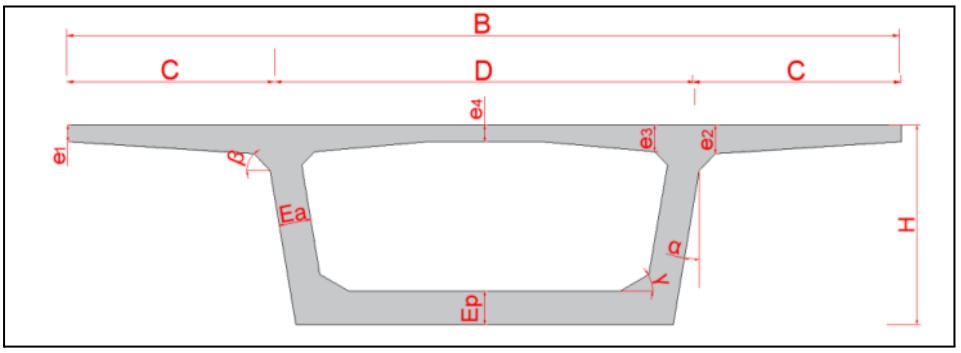


Figure II.7 : Schéma de la coupe transversale d'un voussoir a hauteur constante

Tableau II.3 : Dimensionnement du voussoir

Elément		Procédé	Valeur adoptée
Hauteur du voussoir		$\frac{L}{16} < H < \frac{L}{18}$	4m (*)
Largeur du voussoir B		-	13.6 m
Largeur d'encorbellement C		B/4	3.4 m
Entraxe des âmes D		B – 2 C	6.8 m
Épaisseur de l'hourdis	e_1	e1 ≥ 16 à 18 cm	0.25 m

supérieur	e_2	C/7 ≤ e2 ≤ C/8	0.45 m
	e_3	e3 = 10 + D/0.25 tel que e3> e2 - 10 et e3 > 1.5 e4	0.40 m
	e_4	D/30 ≤ e4≤ D/25	0.25 m
Inclinaison de l'âme α		entre 10% et 30%	20 %
Épaisseur de l'âme		$e_a \geq 0.26 + L/500$	0.4 m
Pente du gousset supérieur β		entre 40° et 45°	30^0
Pente du gousset inférieur γ		entre 30° et 45°	40^0
Épaisseur de l'hourdis inférieur		e_p= (2 à 2.5) e_c entre 35 et 80 cm	0.6 m

(*) Dans le cas des ponts ferroviaires, la hauteur doit être surélevée à cause du type de charge et la vibration ferroviaire.

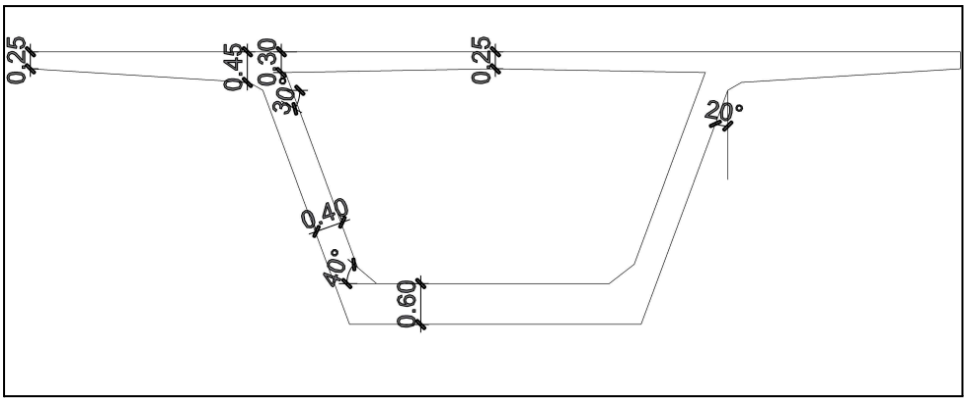


Figure II.8 : Dimensionnement du voussoir

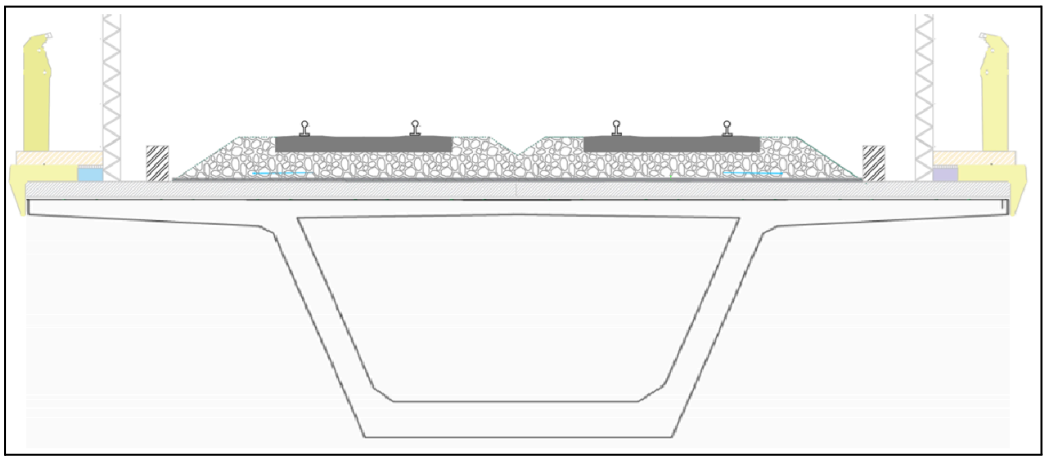


Figure II.9 : Coupe transversale de la variante (2)

- **Conception de l'infrastructure**
  - **Conception de la pile**

Tableau II.4 : Dimensions de la pile

Élément	Valeur
Hauteur (m)	variable
Largeur (m)	3.5
Longueur (m)	8
Epaisseur des parois (m)	0.8
largeur du chevêtre (m)	3
Hauteur du chevêtre (m)	2
type de fondation (m)	profonde avec pieux de diamètre 1.2
semelle (mxmxm)	16.8 x 13.6 x 2.5

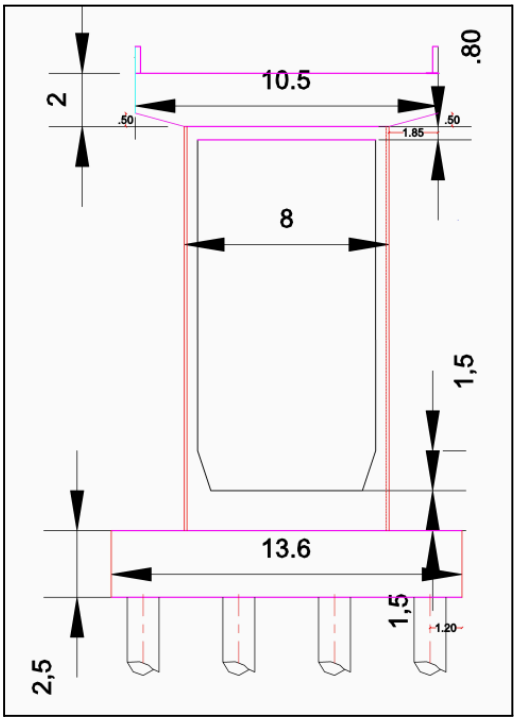


Figure II.10 : Coupe transversale de la pile

II.2.3- Variante 3 : Pont Mixte (Acier - Béton) Bipoutres

• Présentation de la variante

Un pont mixte à bipoutres est une structure combinant poutres en acier et tablier en béton armé ou précontraint. Les deux poutres constituent l'ossature principale de l'ouvrage et assurent la résistance aux efforts de traction et de flexion, tandis que le tablier en béton participe à la rigidité globale, assure la résistance à la compression et répartit les charges uniformément sur les poutres.

Ce type de pont est particulièrement adapté aux portées moyennes à longues, où il permet de réduire la masse totale de l'ouvrage par rapport à un pont entièrement en béton, tout en conservant une grande durabilité et une bonne performance structurelle.

• Implantation des appuis :

La conception longitudinale du pont a été définie de manière à optimiser la répartition des efforts tout en limitant les portées excessives, ce qui permet d'assurer un bon compromis entre performance structurelle, économie de matériaux et facilité d'exécution.

En constatant des problèmes liés au gabarit de la route que franchira notre ouvrage au voisinage du PK 03+ on opte pour une variante à deux tabliers de portées différentes; 9 travées de 45m et deux travées de 30m, comme l'indique le schéma ci-dessous:

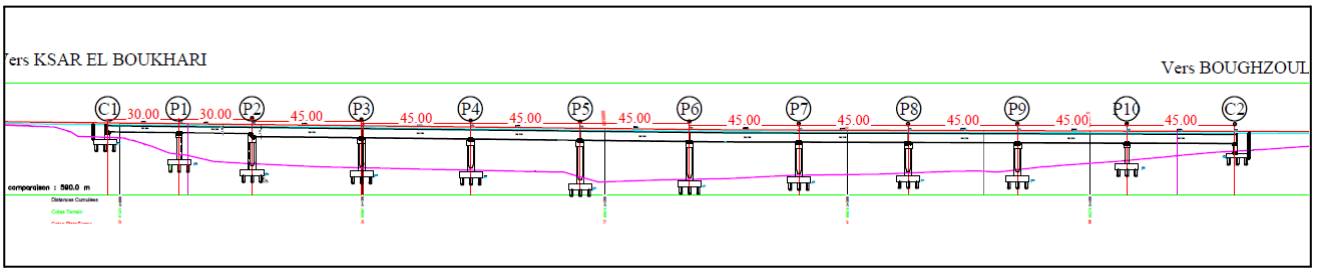


Figure II.11 : Profil en long de la variante (03)

• Conception transversale :

Avec une largeur de tablier de 13.60m, le pont repose sur deux poutres PRS avec un entraxe de 6.00m, rigidifiées par des entretoises répartie sur toute la longueur de l'ouvrage et disposées chaque 5m. La dalle repose sur les poutres et la liaison composite est assurée par le biais des goujons.

➢ Tablier 01 (45.00m)

La hauteur des poutres : avec une longueur de 45m , on prend une hauteur de **h = 3,5 m.**

Epaisseur de l'ame : $t_w \geq 0{,}005\ h_w$ donc $t_w \geq 0{,}0175$ m, on prend : $t_w = 0{,}03$ m, **soit**

t_w **= 30mm**

Pour S1 on utilise les dimensions suivantes:

Semelle inférieure : b_{inf} **= 1200 mm** , et t_{inf} **= 40 mm**

Semelle supérieure : b_{inf} **= 1000 mm ,** et t_{inf} **= 30 mm**

Tableau II.5 : Épaisseurs des âmes et des semelles dans différentes sections

	Semelle sup	Ame	Semelle inf
Section 1	30 mm	30 mm	40 mm
Section 2	40 mm	30 mm	50 mm
Section 3	50 mm	30 mm	60 mm

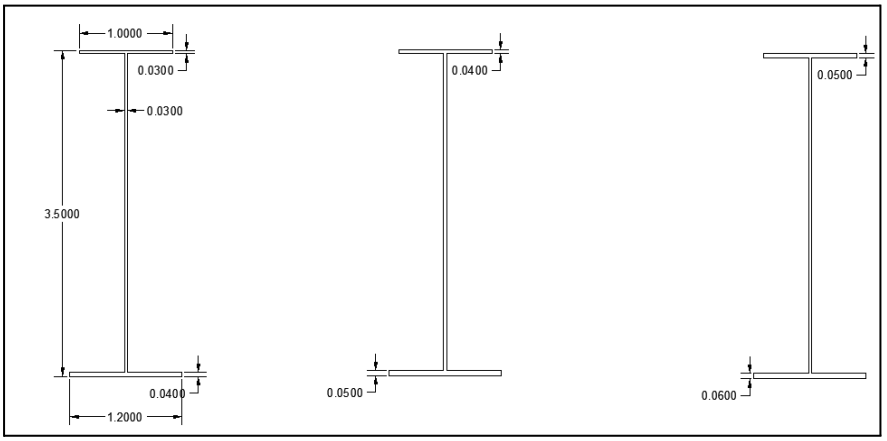


Figure II.12 : Dimensions des différentes sections métalliques

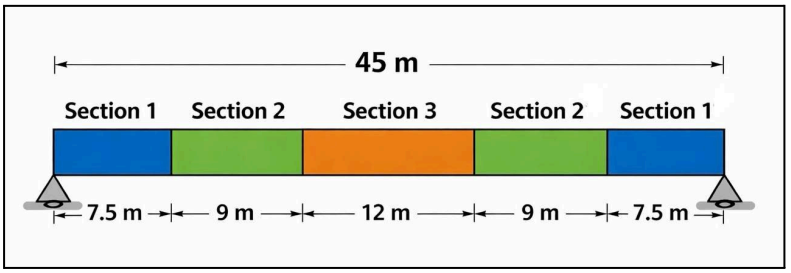


Figure II.13 : Distribution des sections au long de la poutre

Les entretoises : Réparties de manière régulière sur la longueur du tablier, l'entretoisement choisi est un entretoisement rigide de type triangulé; fait de barres de type 2 UPN 200 assemblées par boulons à des montants, et des membrures supérieures et inférieures de type PRS 1500/2, et des PRS 2000 sur appuis, espacées de 5m, tout au long d'un contreventement en X au bas du tablier fait par des 2 UPN 200.

La fonction de l'entretoise dans le pont à poutre est résumée comme suit :

- La stabilisation des poutres contre le déversement
- Le contreventement horizontal avec le platelage, pour le report des charges horizontales du vent sur les appuis
- Répartition des charges entre les poutres principales

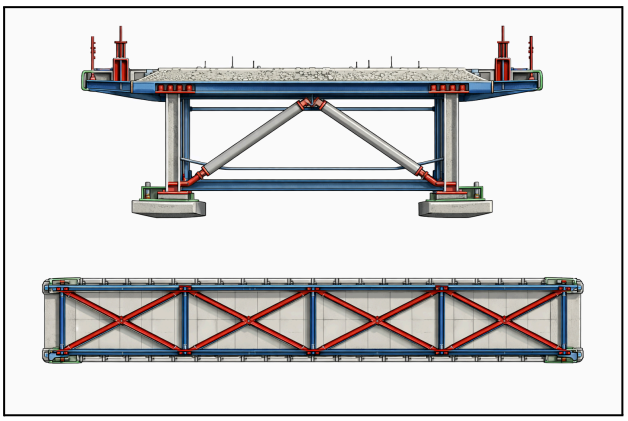


Figure II.14 : Types d'entretoisement

➢ Tablier 02 (30.00 m)

La hauteur des poutres : avec une longueur de 30m , on prend une hauteur de **h = 2.5 m.**

Epaisseur de l'ame : $t_w \geq 0{,}005\ h_w$ donc $t_w \geq 0{,}0125$ m, on prend : $t_w = 0{,}03$ m, **soit**

t_w **= 30mm**

Pour S1 on utilise les dimensions suivantes:

Semelle inférieure : b_{inf} **= 1200 mm** , et t_{inf} **= 40 mm**

Semelle supérieure : b_{inf} **= 1000 mm ,** et t_{inf} **= 30 mm**

Tableau II.6 : Épaisseurs des âmes et des semelles dans différentes sections

	Semelle sup	Ame	Semelle inf
Section 1	30 mm	30 mm	40 mm
Section 2	40 mm	30 mm	50 mm
Section 3	50 mm	30 mm	60 mm

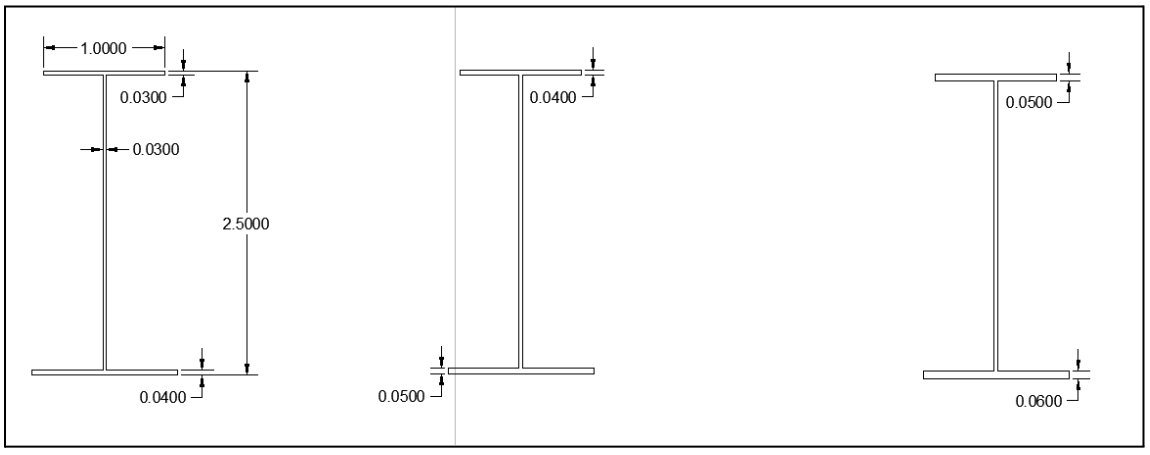


Figure II.15 : Dimensionnement des différentes sections métalliques

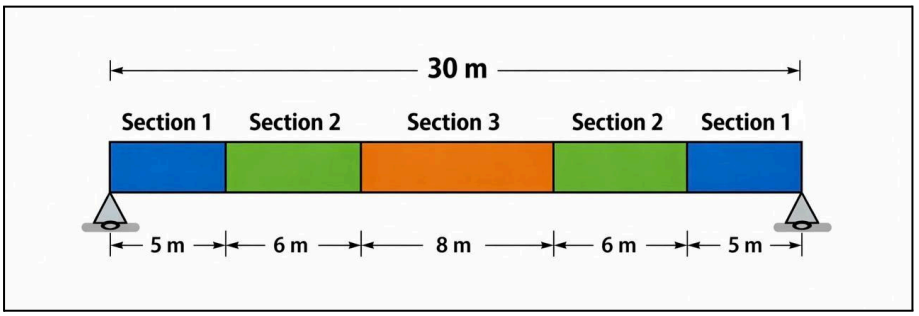


Figure II.16 : Distribution des sections au long de la poutre

Les entretoises : Réparties de manière régulière sur la longueur du tablier, l'entretoisement choisi est un entretoisement rigide de type triangulé; fait de barres de type 2 UPN 200 assemblées par boulons à des montants, et des membrures supérieures et inférieures de type HEB 800/2, et des HEB 1000 sur appuis, espacées de 5m, tout au long d'un contreventement en X au bas du tablier fait par des UPN 200.

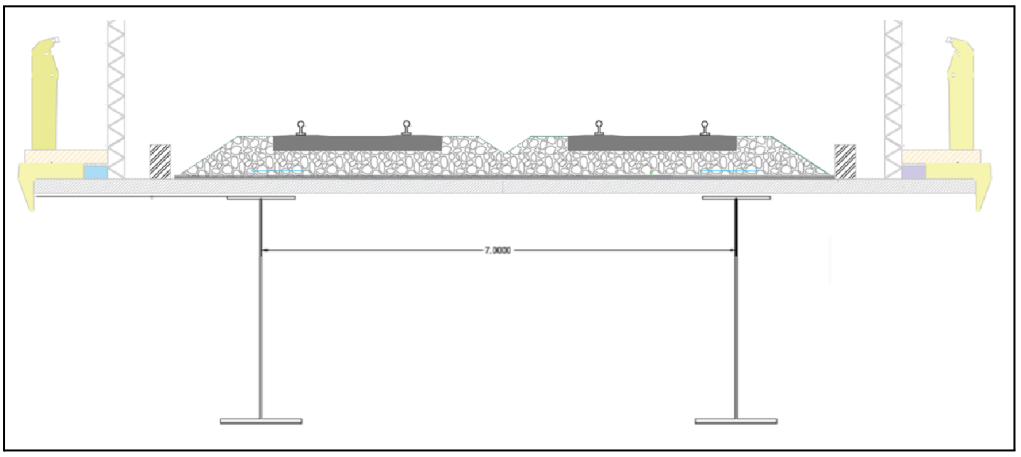


Figure II.17 : Coupe transversale type de la variante (3)

• Conception de l'infrastructure

- Conception de la pile

Tableau II.7 : Conception de la pile

Élément	Valeur
Hauteur (m)	variable
Largeur (m)	3.5
Longueur (m)	8
Epaisseur des parois (m)	0.6
largeur du chevêtre (m)	3
Hauteur du chevêtre (m)	2

type de fondation (m)	profonde avec pieux de diamètre 1.2
semelle (mxmxm)	16.8 x 13.6 x 2.5

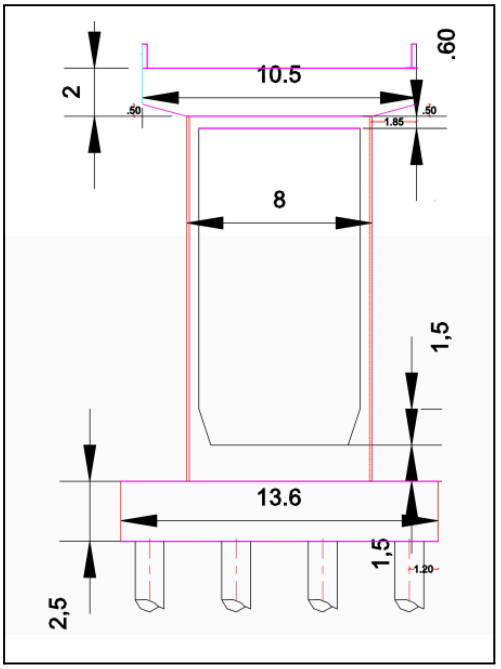


Figure II.18 : Coupe transversale de la pile

- **Conception de la culée**

Tableau II.8 : Conception de la culée

Élément	Valeur	
Mur frontal	**hauteur**	variable
	longueur (m)	13.6
	largeur (m)	1.8
Mur en retour	**épaisseur (m)**	0.8
Mur garde grève	**Hauteur (m)**	3
	Épaisseur (m)	0.4
Semelle	**Hauteur (m)**	2
	Largeur (m)	14
	Longueur (m)	9.6
Pieux	**entraxe (m)**	3.8
	diamètre (m)	1.2

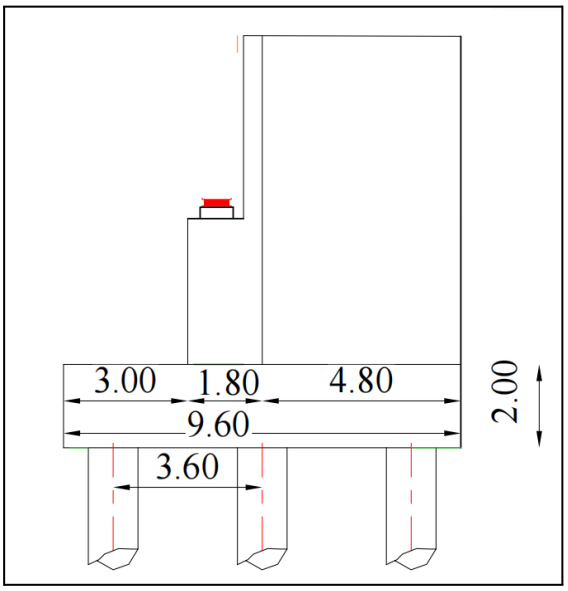


Figure II.19 : Coupe latérale de la culée

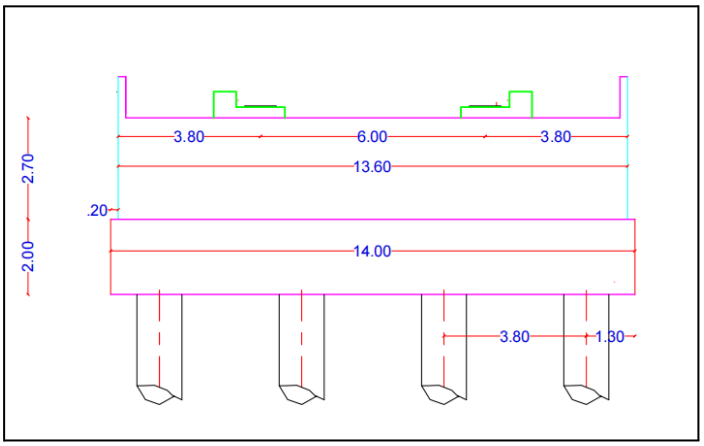


Figure II.20 : Coupe transversale de la culée

II.3- Etude comparative des variantes

1. Pont à poutres en béton précontraint post-tension

Avantages :

- Possibilité de préfabrication sur chantier.
- Grande capacité portante et longévité élevée.
- Réduction des fissures grâce à la post-tension.
- Adapté aux portées moyennes et longues.

Inconvénients :

- Structure relativement massive, parfois moins esthétique.
- Nécessite un contrôle précis.
- Plus sensible aux défauts de mise en œuvre.

2. Pont voussoirs en béton précontraint construit par encorbellements successifs

Avantages :

- Permet de réaliser de grandes portées sans échafaudage au sol.
- Construction progressive adaptée aux sites difficiles.
- Bonne continuité du tablier et rigidité élevée.
- Réduction de coffrage par encorbellement

Inconvénients :

- Temps de construction relativement long.
- Mise en œuvre complexe nécessitant un contrôle rigoureux.
- Coût plus élevé pour les moyens de levage et étaiement temporaire.

3.Pont mixte (acier + béton) bipoutres

Avantages :

- Combine résistance à la traction de l'acier et résistance à la compression du béton.
- Structure relativement légère.
- Capacité de réaliser de grandes portées avec moins de matériaux.
- Flexibilité dans le choix des sections et formes.
- Rigidité élevée.

Inconvénients :

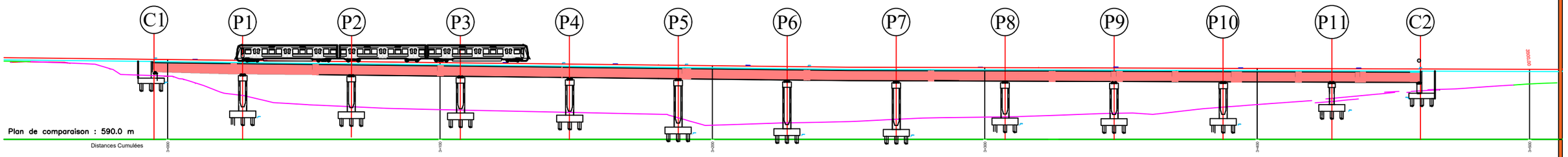
- Coût élevé en raison de la combinaison de matériaux.
- Entretien plus complexe (pathologies possibles: corrosion de l'acier, fissuration du béton).
- Calculs et conception plus sophistiqués (main d'œuvre qualifiée nécessaire)

Conclusion :

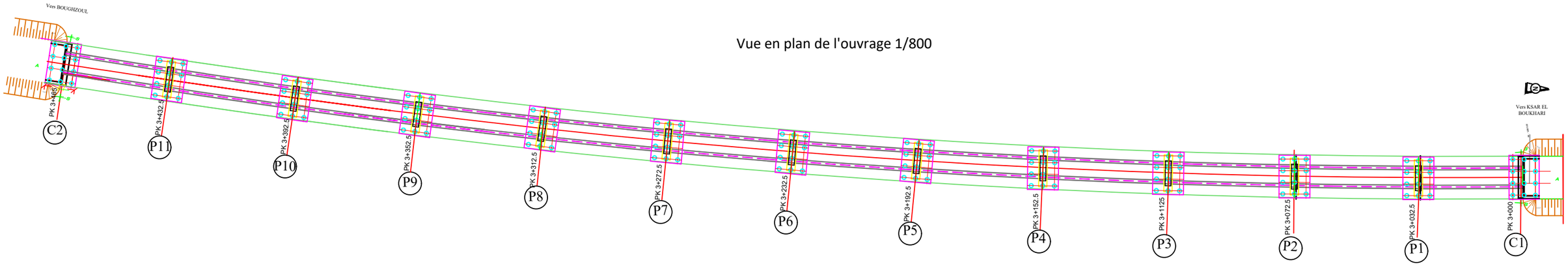
À l'issue de l'analyse multicritère des trois variantes effectuée , la solution retenue est la variante 03: **Pont Mixte (Acier - Béton) Bipoutres** comme le meilleur compromis. En dépit de son coût relativement plus élevé en matériaux, elle se distingue par une réalisation rapide, une bonne adaptation aux tracés courbes et un meilleur aspect esthétique.

Ainsi, cette variante a été adoptée comme solution de référence pour la suite

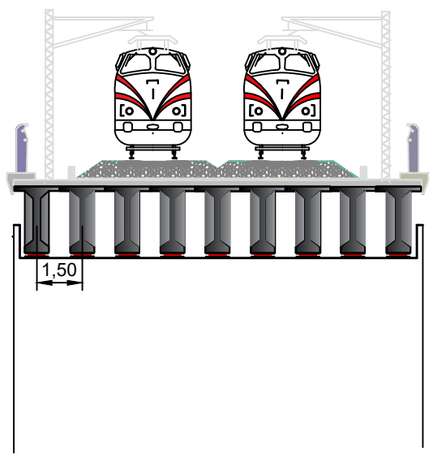
Coupe longitudinale de l'ouvrage 1/700



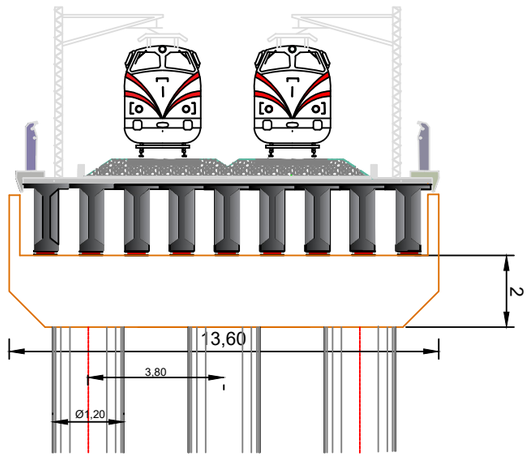
Vue en plan de l'ouvrage 1/800



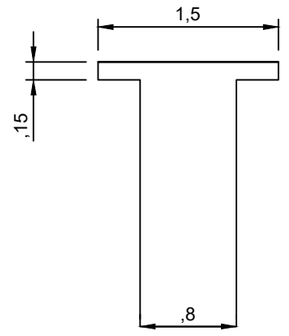
Coupe transversale sur culée 1/200



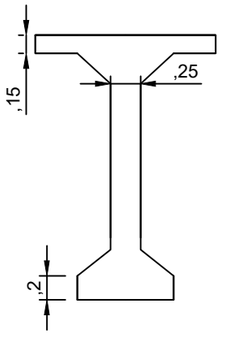
Coupe transversale sur pile 1/200



Coupe transversale des poutres en zone d'about 1/50



Coupe transversale des poutres en zone courante 1/50

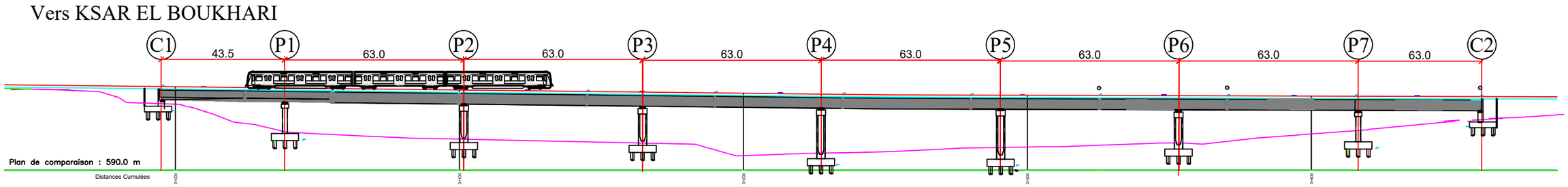


ENSTP
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Built and Ground Works Engineering

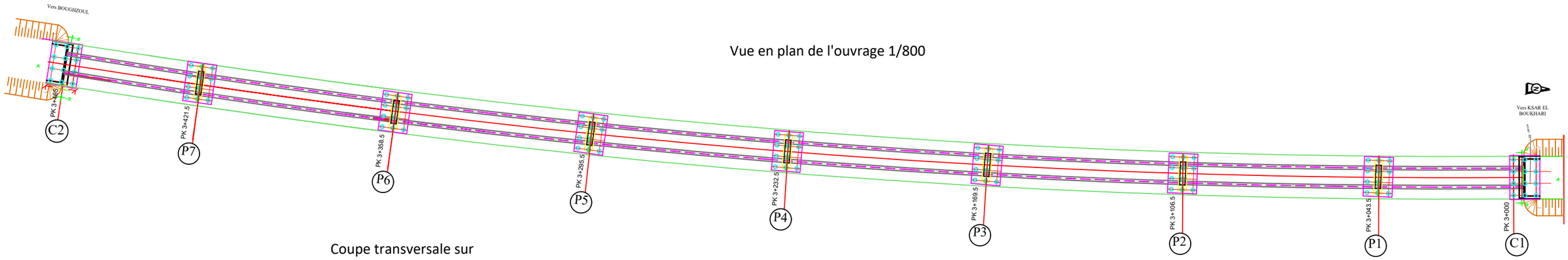
Adresse : Rue Sidi Garidi b.p. 32 Vieux Kouba -16051. Alger
Fax : (023) 70 19 38 **Site web :** www.enstp.edu.dz
Tel : (023) 70 19 04 **E-mail :** enstp@enstp.edu.dz

PROJET DE FIN D'ETUDES	Réalisé par	Encadré par	Département	Variante	Année universitaire
CONCEPTION ET ETUDE D'UN VIADUC FERROVIAIRE DU PK 3+000 AU PK 3+465 DE LA NOUVELLE LIGNE BOUMEDFAA - DJELFA	ROUABAH SI BACHIR	ING. SEBAH Omar	DIB	03	2025 / 2026

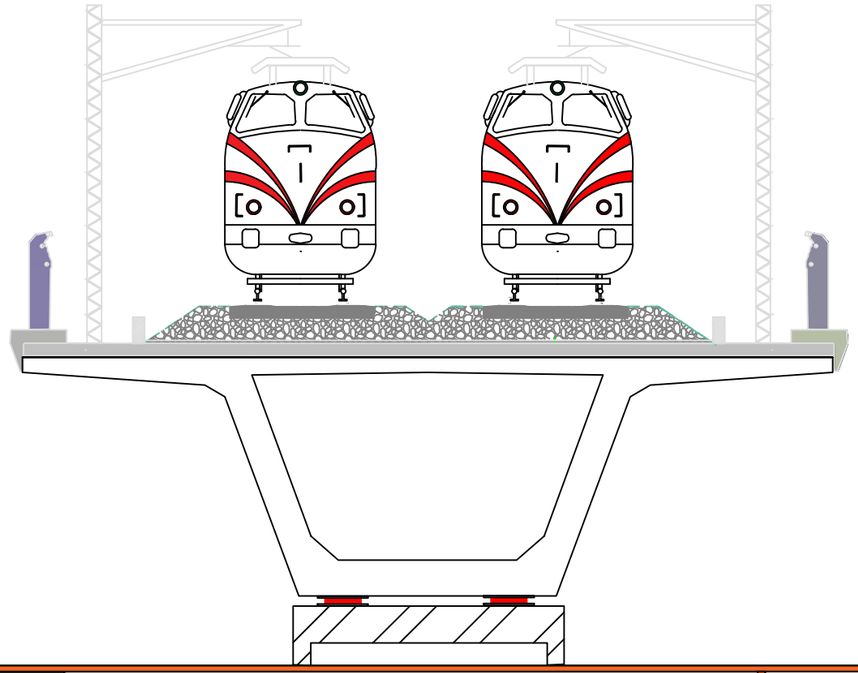
Coupe longitudinale de l'ouvrage 1/700



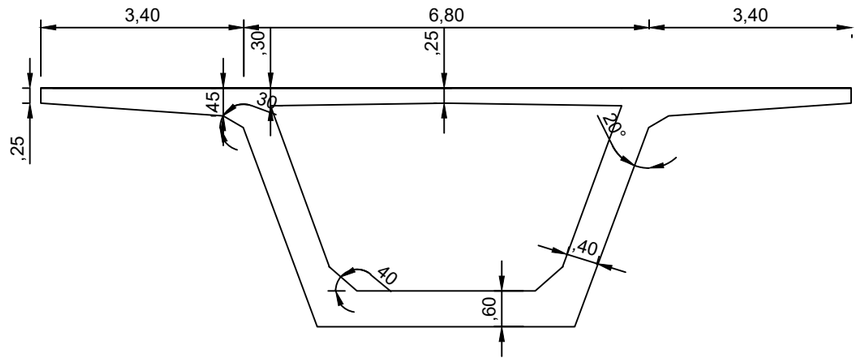
Vue en plan de l'ouvrage 1/800



Coupe transversale sur pile 1/100



Coupe transversale du voussoir 1/100

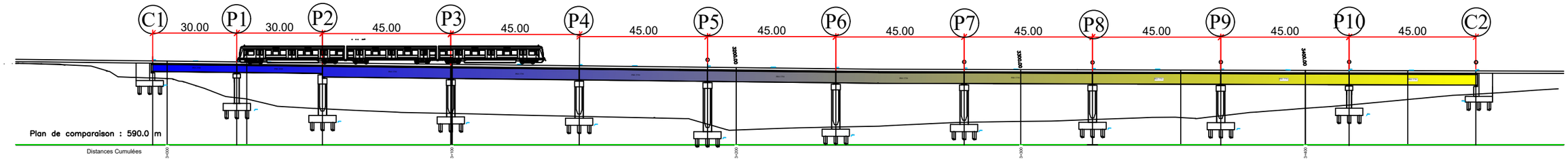


ENSTP
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Built and Ground Works Engineering

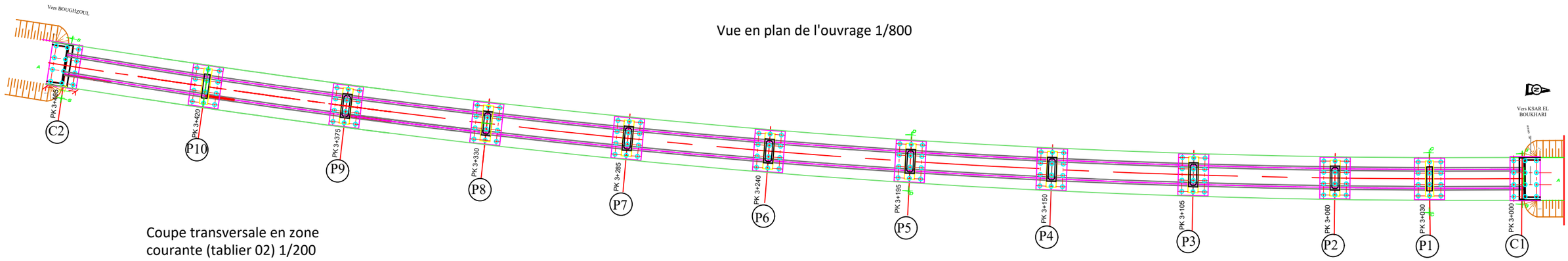
Adresse : Rue Sidi Garidi b.p. 32 Vieux Kouba -16051. Alger
Fax : (023) 70 19 38 Site web : www.enstp.edu.dz
Tel : (023) 70 19 04 E-mail : enstp@enstp.edu.dz

PROJET DE FIN D'ETUDES	Réalisé par	Encadré par	Département	Variante	Année universitaire
CONCEPTION ET ETUDE D'UN VIADUC FERROVIAIRE DU PK 3+000 AU PK 3+465 DE LA NOUVELLE LIGNE BOUMEDFAA - DJELFA	ROUABAH SI BACHIR	ING. SEBAH Omar	DIB	02	2025 / 2026

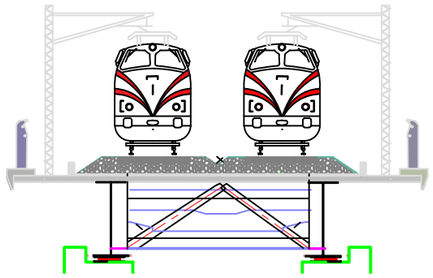
Coupe longitudinale de l'ouvrage 1/700



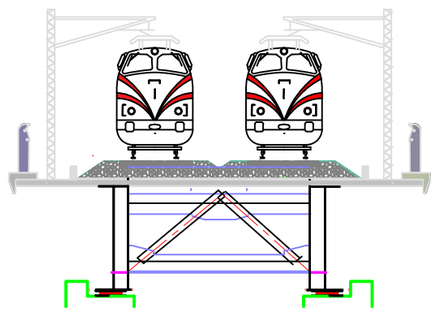
Vue en plan de l'ouvrage 1/800



Coupe transversale en zone courante (tablier 02) 1/200

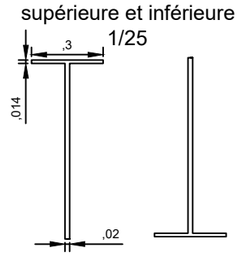


Coupe transversale en zone courante (tablier 01) 1/200

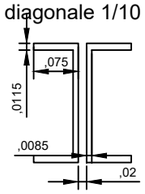


Coupe transversale des entretoises tablier 01

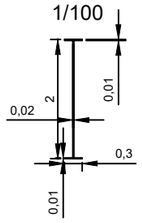
entretoise courante supérieure et inférieure 1/25



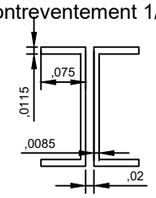
entretoise en diagonale 1/10



entretoise d'about 1/100

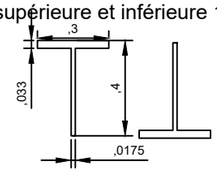


entretoise de contreventement 1/10

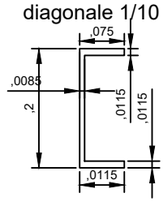


Coupe transversale des entretoises tablier 02

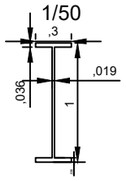
entretoise courante supérieure et inférieure 1/25



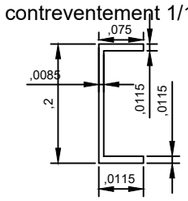
entretoise en diagonale 1/10



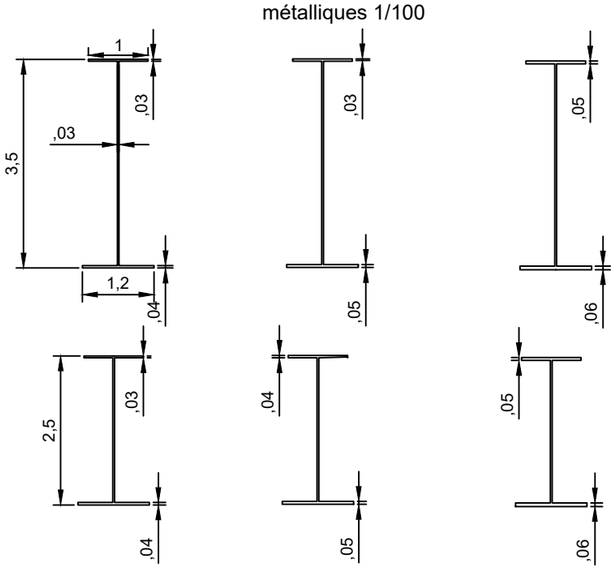
entretoise d'about 1/50



entretoise de contreventement 1/10



Coupe transversale des sections métalliques 1/100



ENSTP
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Built and Ground Works Engineering

Adresse : Rue Sidi Garidi b.p. 32 Vieux Kouba -16051. Alger
Fax : (023) 70 19 38 **Site web** : www.enstp.edu.dz
Tel : (023) 70 19 04 **E-mail** : enstp@enstp.edu.dz

PROJET DE FIN D'ETUDES	Réalisé par	Encadré par	Département	Variante	Année universitaire
CONCEPTION ET ETUDE D'UN VIADUC FERROVIAIRE DU PK 3+000 AU PK 3+465 DE LA NOUVELLE LIGNE BOUMEDFAA - DJELFA	ROUABAH SI BACHIR	ING. SEBAH Omar	DIB	03	2025 / 2026

CHAPITRE III : CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX ET HYPOTHÈSES DE CALCUL

III.1- Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les caractéristiques des matériaux utilisés dans l'ouvrage et ainsi que les hypothèses de calcul, et cela en décrivant les bases de la modélisation et les conditions à prendre en compte pour évaluer correctement le comportement de la structure sous les différentes sollicitations, pendant la construction et l'exploitation.

III.2- Normes et règlements

- Eurocode 1 - bases de calcul et actions sur les structures ;
- Eurocode 2 - projet des structures de béton ;
- Eurocodes 3 et 4 – construction mixte ;
- Eurocode 7 - projet géotechnique ;
- Eurocode 8 - indications établies pour la résistance sismique des structures ;
- Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites - BAEL 91 révisé 99 ;
- Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art - RPOA 2008 ;
- Code UIC 776-1 charge à prendre dans le calcul des ponts rails.

III.3- Caractéristiques des matériaux

La sélection des matériaux de construction est un élément non négligeable pendant la conception et le dimensionnement du pont, car cela est directement lié au comportement du pont et sa durabilité. On présentera dans ce qui suit les principales propriétés mécaniques et physiques du béton, des armatures passives et des aciers employés pour les poutres métalliques, en précisant le rôle du béton, des armatures passives et celui des aciers dans l'ouvrage.

III.3.1- Béton

Le béton est un matériau de construction composite obtenu par le mélange de ciment, de granulats et d'eau. Après sa mise en œuvre, il durcit par hydratation du ciment et développe une bonne résistance à la compression, ce qui le rend particulièrement adapté aux ouvrages d'art.

Dosage :

Dans la construction d'éléments porteurs, le béton couramment utilisé est celui dosé à 400kg/m³ de ciment CPA (ciment de Portland à prise accélérée) pour assurer des performances mécaniques qui répondent aux exigences de l'ouvrage.

Densité:

La masse volumique du béton armé : γ = 25 KN/m^3.

Résistance en compression :

La résistance du béton est habituellement déterminée après 28 jours, on l'exprime par la résistance caractéristique à la compression, notée f_{c28}.

on choisit

- pour le béton de la dalle f_{c28}= 30 MPa
- pour le béton des autres éléments f_{c28}= 27 MPa.

Pour j jours, la résistance caractéristique à la compression sera :

$$f_{cj} = \frac{1}{4.76+0.83j} f_{c28} \text{ si } f_{c28} \leq 40\ MPa \text{ sinon } f_{cj} = \frac{1}{1..4+0.95j} f_{c28}$$

Résistance à la traction :

La résistance du béton à la traction est relativement faible par rapport à sa résistance à la compression, on calcule cette dernière à l'aide de la formule suivante :

$f_{t28} = 0.6 + 0.06\ f_{cj}$ pour des valeurs f_{c28} inférieures à 60 MPa

On choisit une résistance supérieure pour la dalle par rapport aux autres éléments car une résistance élevée du béton est nécessaire à cause des grandes sollicitations qu'elle doit supporter.

En appliquant les formules adéquates on détermine ainsi les caractéristiques de résistance du béton utilisé dans notre ouvrage, présentées dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.1 : Caractéristiques du béton de l'ouvrage

Elément de l'ouvrage	Classe de résistance	f_{c28} (MPa)	f_{t28} (MPa)
Dalle	C30/37	30	2.4
Piles	C25/30	27	2.22

Pieux de fondation	C25/30	27	2.22
Semelles de fondation	C25/30	27	2.22

Contraintes admissibles du béton :

Les contraintes admissibles du béton sont les valeurs limites de contrainte que le matériau peut supporter sans risque de rupture, cela est assuré à l'aide de coefficients de sécurité préalablement calculés.

on distingue deux états limite dans le calcul des contraintes admissibles:

1. État limite ultime (E.L.U)

On utilise la formule: $f_{bu} = \frac{0.85}{\gamma b * \theta} * f_{c28}$

tel que :

θ est un coefficient fixé à 1 lorsque la durée probable d'application de la combinaison d'action considérée est supérieure à 24 h, à 0.9 lorsque cette durée est comprise entre 1 h et 24 h, et à 0.85 lorsqu'elle est inférieure à 1 h.

γb prend la valeur de 1.5 en situations durables ou transitoires et 1.15 en situations accidentelle

2. État limite de service (E.L.S)

On utilise la formule $\sigma_{bc}=0.6 \times f_{c28}$

En appliquant les formules données au paravent on détermine ainsi les contraintes admissibles aux deux états limites, pour une valeur de θ=1, les résultats sont présentées dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.2 : Contraintes admissibles

Etat limite	Contrainte limite (MPa)	γ_b	Dalle	Piles et infrastructure (pieux, semelles)
Ultime	f_{bu}	1.5	17	15.3
		1.15	22.17	19.95
De service	σ_{bc}		18	16.2

Déformation longitudinale du béton :

On distingue deux modules de déformation du béton

1. Module de déformation instantanée: utilisé pour les calculs sous chargement de durée inférieure à 24h

Pour le calculer, on utilise la loi : $E_{ij} = 11000 * \sqrt[3]{fcj}$

2. Module de déformation différée: concerne les calculs sous chargement de longue durée (>24h)

Pour le calculer, on utilise la loi : $E_{vj} = 3700 * \sqrt[3]{fcj} \simeq \frac{Eij}{3}$

En appliquant les formules données au paravent on détermine ainsi les module de déformation, ces derniers sont présentées dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.3 : Modules de déformation

Module de déformation	Instantanée		Différée	
Elément de l'ouvrage	Piles, pieux et semelles de fondation	Dalle	Piles, pieux et semelles de fondation	Dalle
Application numérique (MPa)	33000	34179.56	11100	11496.76

Module de Déformation transversale :

Le module de déformation transversale (aussi nommé module de cisaillement) est une caractéristique qui indique la capacité d'un matériau à résister aux déformations quand on y soumet des efforts de telle sorte qu'ils soient appliquées perpendiculairement à sa fibre principale, reflétant ainsi sa rigidité latérale.

Le module de cisaillement est noté G, ce dernier est donné par la formule: $G = \frac{E}{2(\nu+1)}$

avec ν: coefficient de poisson

Coefficient de poisson :

Le coefficient de Poisson est un paramètre qui a pour but de démontrer le rapport entre la déformation latérale et la déformation longitudinale d'un matériau, caractérisant ainsi son comportement élastique transversal.

il est donné tel que:

- ν = 0.2 pour le béton
- ν = 0.3 pour l'acier
- ν = 0 pour le calcul des sollicitations.
- ν = 0.2 pour le calcul des déformations.

III.3.2- Aciers

L'acier est un matériau essentiel dans les structures mixtes, grâce à sa résistance élevée en traction et sa ductilité, il assure la reprise des efforts structuraux essentiellement dans les éléments porteurs tels que les poutres. Le choix des aciers repose sur des exigences de résistance, de durabilité, et de stabilité, tout en restant dans le cadre des règlements.

Aciers d'armatures :

Le type des aciers utilisés pour les armatures du béton sont les aciers à haute adhérence dont les caractéristiques sont :

- Nuance d'acier : FeE500
- Limite d'élasticité : fe=500 MPa
- Module de déformation élastique : Es=200GPa
- Coefficient de fissuration : η=1.6 (Armatures à haute adhérence)

Contraintes limite de traction des aciers

- ELS en fissuration préjudiciable : $\sigma s = \min\left(\frac{2}{3} fe\ ;\ Max\ (0.5fe\ ;\ 110\sqrt{\eta f tj}\right)$
- ELU- Fondamental : $\sigma s = \frac{fe}{\gamma s}$ $avec\ \gamma s$=1.15
- ELU - Accidentel : $\sigma s = \frac{fe}{\gamma s}$ $avec\ \gamma s$=1.00

Tableau III.4 : Contraintes limite de traction des aciers

Contraintes limite de traction des aciers (MPa)		
Etat	Superstructure	Infrastructure
ELS en fissuration préjudiciable	250	250
ELU- Fondamental	434.8	434.8
ELU - Accidentel	500	500

Aciers de PRS :

La nuance d'acier utilisée pour les poutres et les connecteurs est le S355, couramment employé dans les structures métalliques pour ses bonnes propriétés mécaniques. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Masse volumique : 78 kN/m3
- Coefficient de poisson : ν=0.3
- Module d'élasticité longitudinal : 210 GPa

Tableau III.5 : Limite d'élasticité f_y en fonction de l'épaisseur des tôles

Epaisseur	t ≤ 16 mm	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	63 < t ≤ 80	80 < t ≤ 100	100 < t ≤ 150
$f_y\,(MPa)$	355	345	335	325	315	295

Tableau III.6 : Contraintes limites de rupture f_u en fonction de l'épaisseur des tôles

Epaisseur	t ≤ 3 mm	3 < t ≤ 100	100 < t ≤ 150	63 < t ≤ 80
$f_u\,(MPa)$	510	490	470	450

Tableau III.7 : Coefficients partiels de sécurité sur les matériaux

γ_M (Charpente)		γ_V (Goujons)
γ_{M1}= 1.0 γ_{M2}= 1.1 γ_{M3}= 1.25	- Plastification, instabilité locale - Instabilité d'élément - Ruine de section nette tendue	1.25 (Situation transitoire)
Eurocode 3		Eurocode 4

CHAPITRE IV : ÉTUDE DES CHARGES ET SOLLICITATIONS

IV.1- Introduction

Le pont ferroviaire porte son propre poids ainsi que les charges changeantes dues au mouvement des trains, aux conditions météorologiques et aux impacts dynamiques liés à la circulation. Il est crucial d'appréhender et de quantifier les charges pour assurer la sécurité, la constance et la pérennité du pont ferroviaire. Il est essentiel de contrôler constamment les charges afin d'assurer que le pont ferroviaire demeure sûr, stable et pérenne.

Ce chapitre introduira les diverses sortes de charges et de surcharges susceptibles d'affecter le pont.

Par la suite, ce chapitre examinera l'influence des charges sur la structure. L'analyse déterminera les principales forces et fournira une base solide pour le calcul et la conception du pont.

IV.2- Évaluation des actions et sollicitations

On distingue plusieurs types de charges auxquelles l'ouvrage doit résister. Ces charges sont les suivantes:

1. Charges permanentes.
2. Charges permanentes complémentaires.
3. Surcharges d'exploitation.

Nous allons maintenant détailler et analyser ces charges afin de mieux comprendre leurs effets sur la structure.

IV.2.1- Charges permanentes

- Poids propre

Les charges permanentes, ou poids propre, représentent la masse partie du pont. Le tablier, les piles et les fondations sont ces parties et les charges permanentes exercent une pression constante sur la structure.

Tablier 01 : (45.00 m)

Tableau IV.1 : Charges permanentes du tablier (01)

Element		Section (m²)		Longueur (m)	Volume (m^3)	Masse volumique (kN/ m^3)	Nombre	Poids (kN)
Poutre	PRS 3500	Section 1	0.1809	15	2.7135	78	2	1410.1308
		Section 2	0.2023	18	3.6414			
		Section 3	0.2237	12	2.6844			

	PRS 1500	0.03784	6.97	0.2637	78	8	164.5488
	PRS 2000	0.04784	6.97	0.3334	78	2	52.0104
	2 UPN 200	0.006459	4.897	0.0316	78	16	39.4368
	2 UPN 200 Contreventement	0.006459	8.03	0.0519	78	18	72.8676
Dalle		5.44	45	244.8	25	1	6120
Poids total (kN)							7858.994

Tablier 02 : (30.00 m)

Tableau IV.2 : Charges permanentes du tablier (02)

Element		Section (m²)		Longueur (m)	Volume (m^3)	Masse volumique (kN/ m^3)	Nombre	Poids (kN)
Poutre	PRS 2500	Section 1	0.1509	10	1.509	78	2	799.6872
		Section 2	0.1723	12	2.0676			
		Section 3	0.1937	8	1.5496			
	HEB 800	0.03265		6.97	0.2276	78	5	88.764
	HEB 1000	0.03923		6.97	0.2734	78	2	42.6504
	UPN 200	0.0032295		4.255	0.0275	78	10	21.45
	UPN 200 contreventement	0.0032295		8.03	0.0259	78	12	24.2424
Dalle		5.44		30	163.2	25	1	4080
Poids total								5056.794

IV.2.2- Charges permanentes complémentaires

Les charges permanentes complémentaires regroupent les charges fixes supplémentaires qui s'ajoutent au poids propre de l'ouvrage, comme les revêtements, les garde-corps ou les équipements fixes. Les charges permanentes complémentaires augmentent naturellement les sollicitations de la structure ce qui impose leur prise en compte dans le dimensionnement de la structure.

Les éléments qui représentent ces charges supplémentaires sont :

➢ **Les rails**

Les rails sont des barres métalliques longues et solides, habituellement en acier et disposées parallèlement pour créer une voie ferrée. Ils permettent de guider et de porter les trains, en assurant leur déplacement stable et sécurisé. Les rails, fixés sur des traverses, assurent la répartition du poids du train et facilitent son mouvement en réduisant les frottements.

Poids linéaire de deux rails (D'après le tableau A.6 de l'EN 1991-1-1 :2002) est 1,2 KN/m

➢ **Ballast**

Le ballast est une couche de pierres concassées placées sous et autour des traverses des voies ferrées. Il permet de stabiliser les rails, de distribuer le poids des trains et de garantir un bon drainage de l'eau. Le ballast assure la solidité de la voie, son alignement et sa résistance aux vibrations dues aux passages des trains.

Les caractéristiques de cet élément (D'après le tableau A.6 de l'EN 1991-1-1 :2002) sont les suivants :

Le poids volumique du ballast normal : 20 kN/m3

La section est de 4.13m^2

➢ **Garde-corps**

Les garde-corps des ponts ferroviaires sont des barrières de sécurité disposées sur les côtés pour éviter les chutes et protéger le personnel et les équipements, son poids par unité de longueur est 1 KN/m

➢ **Traverses**

Les traverses sont des pièces disposées horizontalement sous les rails du chemin de fer. Elles ont pour but de maintenir les rails en position et de répartir le poids des trains.

Les caractéristiques de cet élément (D'après le tableau A.6 de l'EN 1991-1-1 :2002) sont les suivants : Le poids par unité de longueur est : 4,8 kN/m

➢ **Muret**

Le muret (garde ballast) est en béton, ce qui corresponds à un poids volumique de 25 KN/m^3

La surface du muret est 0.5×0.3 m^2

➢ **Corniche**

On appelle corniche de pont l'élément qui se trouve sur les côtés du tablier du pont, souvent en béton, servant à protéger, à soutenir quelquefois le garde-corps et à donner une finition à l'ouvrage.

La corniche est en béton, ce qui corresponds à un poids volumique de 25 KN/m^3

La surface d'une corniche est 0.263 m^2

➢ **Caniveaux**

Les caniveaux sont des petits conduits ou rigoles, situés le long du pont, destinés à recueillir et à évacuer l'eau de pluie afin d'éviter les inondations et l'accumulation d'eau, le poids volumique correspondant est de 25 KN/m^3 et la section d'un caniveau $0.087m^2$

➢ **Caténaire**

Le système de câbles électriques suspendus au-dessus des voies ferrées, appelé caténaire, alimente les trains en électricité. Un pantographe fixé sur le toit du train lui fournit le courant nécessaire à sa propulsion.

Le poids d'un seul caténaire est estimé à 2.4kN/ml.

➢ **Chape de béton**

On coule une couche de béton d'environ 1 cm.

➢ **Trottoir**

On choisit un trottoir de largeur 0.3m et longueur 1.2 m

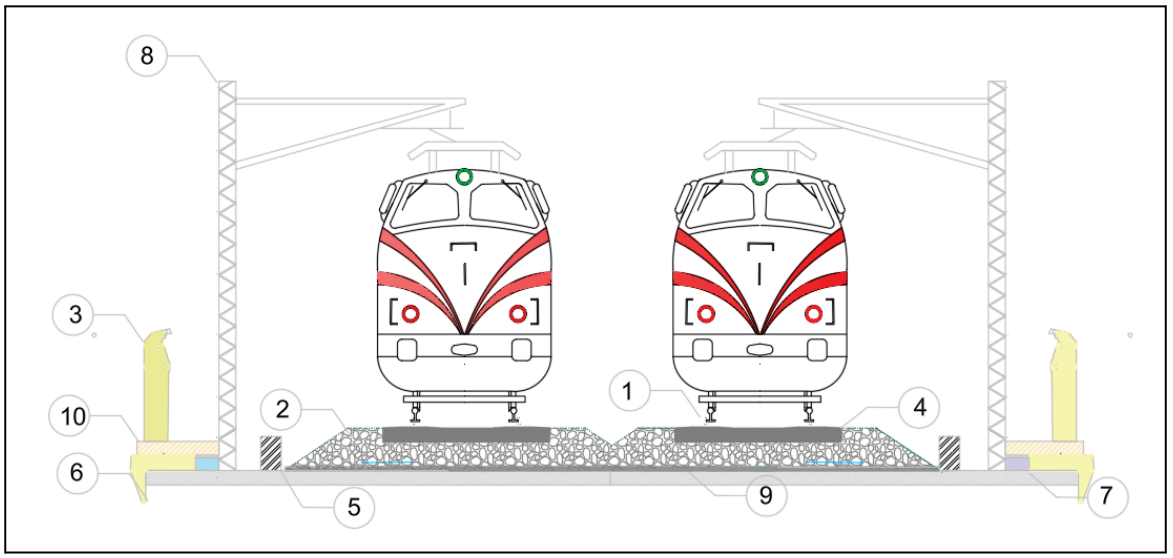


Figure IV.1 : Evaluation des charges permanentes complémentaires

On résume les charges complémentaires dans ce tableau ci-dessous :

Tableau IV.3 : Valeurs des charges permanentes complémentaires

Elément	Application numérique	Poids (kN/ml)
Rails (1)	2 × 1.2	2.4
Ballast (2)	4.13 × 20	82.6
Gardes-corps (3)	2 × 1	2
Traverses (4)	2 × 4.8	9.6
Murets (5)	2 × 25 × 0.5 × 0.3	7.5
Corniches (6)	0.263 × 25 × 2	13.15
Caniveaux (7)	0.18 × 25 × 2	9
Caténaire (8)	2 × 2.4	4.8
Chape de béton (9)	0.01 × 25 × 13.6	3.4
Trottoir (10)	1.2 × 0.3 × 25 × 2	18
Poids complémentaire total		152.45

IV.2.3- Surcharges d'exploitation

Les charges d'exploitation se réfèrent aux contraintes appliquées au pont par l'utilisation normale, comme le transit de trains ou de véhicules. Elles ont un impact sur le comportement de la structure et doivent être considérées lors de sa conception dimensionnelle.

Surcharge d'exploitation ferroviaire :

Les surcharges d'exploitation ferroviaire font référence aux coûts engendrés par le passage des trains. On les considère pour garantir les dimensions et la sécurité de la construction.

❖ Charges verticales (EN 1991-2 :2003 ; article 6.3)

Les actions liées au trafic ferroviaire sont déterminées à l'aide de modèles de charge. Cinq modèles de chargement ferroviaire sont disponibles :

➢ Le modèle de charge 71 (ainsi que le modèle SW/0 pour les ponts continus) destiné à représenter le trafic ferroviaire habituel sur les lignes principales.
➢ Le modèle de charge SW/2, qui illustre les charges lourdes.
➢ Le modèle HSLM est utilisé pour représenter les trains de passagers circulant à des vitesses dépassant 200 km/h.
➢ Le modèle « train vide » sert à illustrer l'effet d'un train sans charge.

Il existe des mesures qui permettent d'ajuster les chargements déterminés en fonction du type de circulation, de sa quantité, des poids maximaux admissibles pour les trains et de l'état des voies.

➢ **Effets statiques :**

- **Modèle de charge 71**

Ce modèle de charge illustre l'impact statique des charges verticales résultant du trafic ferroviaire standard. Pour ajuster le calcul à un trafic moins dense ou plus dense, les valeurs typiques des charges peuvent être multipliées par un coefficient α (α = 0,75 à 1,46).

Ce facteur concerne les efforts verticaux, les forces centrifuges, les forces de traction/freinage, les actions combinées structure-voie et les actions de déraillement. D'après l'article 6.3.2 de l'EN 1991-2 :2003 il est conseillé de fixer le coefficient α à 1 afin d'assurer le confort des voyageurs. Pour les lignes à l'étranger, il est conseillé d'avoir $\alpha \geq 1$.

Ce modèle peut être représenté schématiquement comme suit :

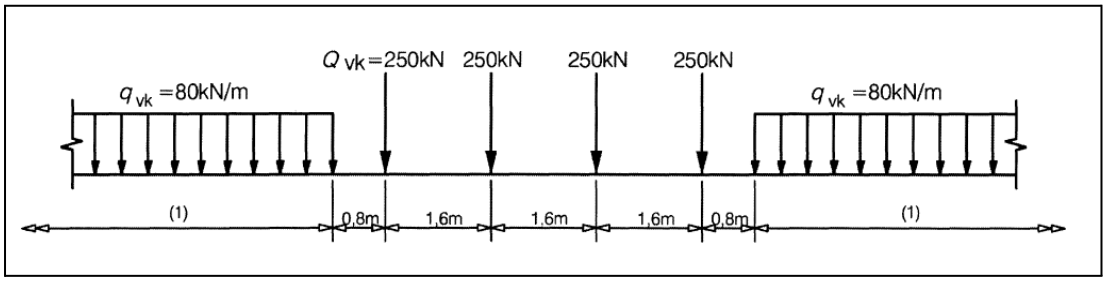


Figure IV.2 : Modèle de charge 71 et valeurs caractéristiques des charges verticales

- **Modèle de charge SW/2**

Le système de charge SW/2 reflète l'effet des charges liées au transport ferroviaire intensif sur les poutres. (article 6.3.3 de l'EN 1991-2 :2003)

Ce modèle peut être représenté schématiquement comme suit :

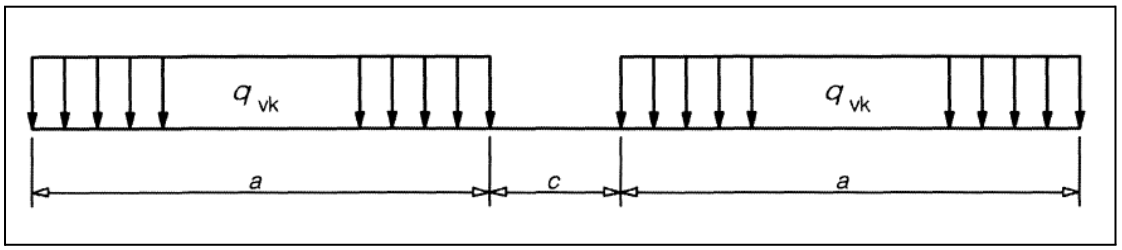


Figure IV.3 : Schéma caractéristique du modèle de charge SW/2.

Tableau IV.4 : Valeurs à prendre pour le système SW/2

Modèle de charge	q_{vk} [KN/m]	a [m]	c [m]
SW/2	150	25	7

- **Modèle de charges « Train à vide »**

Un type de charge spécifique, désigné sous le nom de « train à vide » (D'après l'article 6.3.4 de l'EN 1991-2 :2003), est employé pour certaines vérifications. Ce modèle correspond à une charge verticale uniformément répartie de valeur caractéristique 10,0 kN/m. Ce modèle permet de contrôler la stabilité latérale du pont sous l'action de forces horizontales dues au trafic ferroviaire et à la charge du vent sur la structure et les trains.

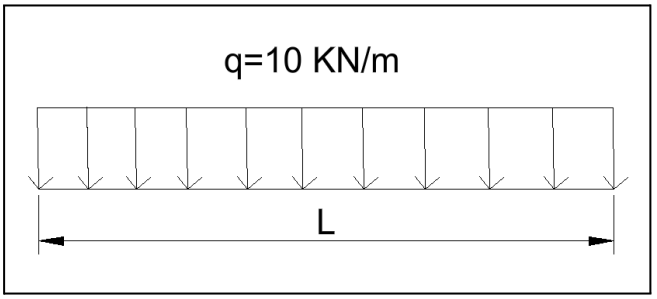


Figure IV.4 : Schéma caractéristique du modèle de charge train à vide

- Excentricité des charges verticales (Modèles de charge 71)

L'excentricité des charges verticales doit être prise en compte avec un rapport des charges des roues pouvant atteindre 1,25 : 1,00. Elle peut être négligée pour le calcul de la fatigue. (Article 6.3.5 de l'EN 1991-2: 2003)

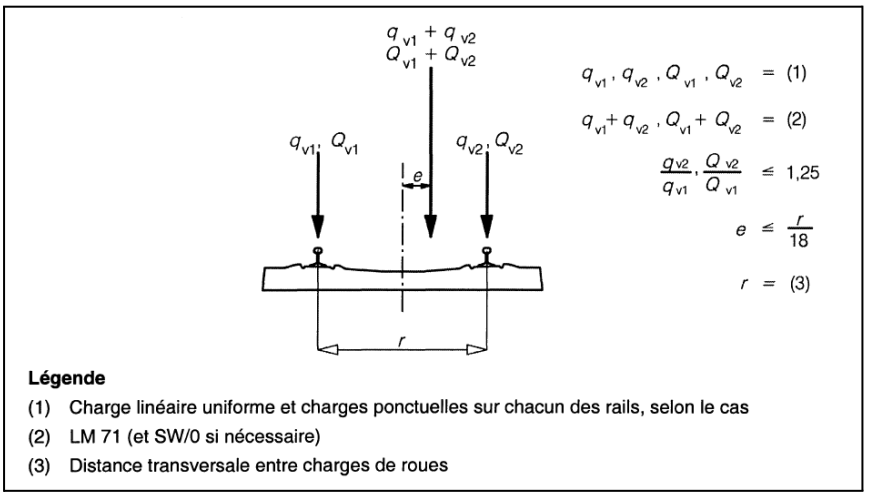


Figure IV.5 : Excentricité des charges verticales

- Répartition des charges d'essieux sur les rails, traverses et ballast :

● Répartition longitudinale d'une force ponctuelle ou d'une charge de roue par le rail :

Une force ponctuelle du modèle de charge 71 (ou charge de roue) peut être distribuée sur trois points d'appui du rail (D'après l'article 6.3.6.1 de l'EN 1991-2 :2003) , cela est démontré dans la figure ci-dessous:

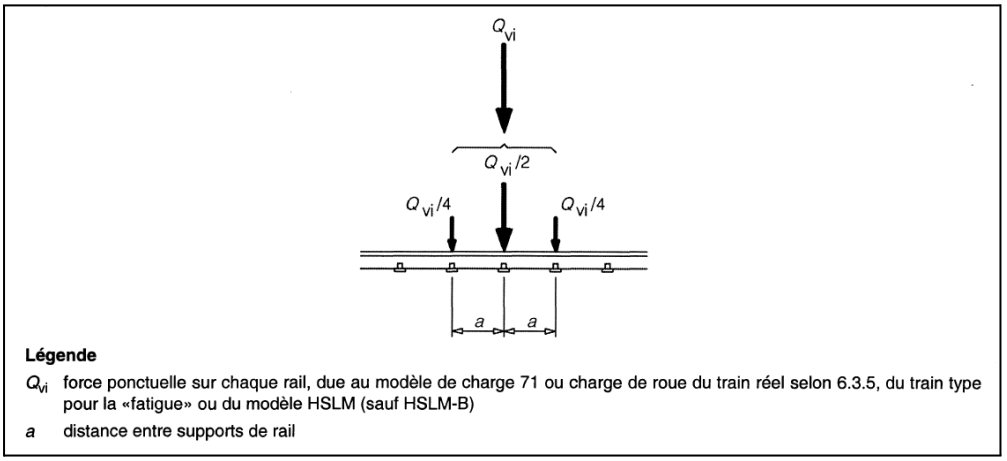


Figure IV.6 : Répartition longitudinale d'une force ponctuelle ou d'une charge de roue par le rail

● Répartition longitudinale des charges par les traverses et le ballast

Il est possible de répartir uniformément les charges ponctuelles du modèle 71 ou les charges par essieu dans la direction longitudinale, à l'exception des effets localisés.

Lors du dimensionnement des composants locaux, il faut tenir compte de la distribution longitudinale sous les traverses.

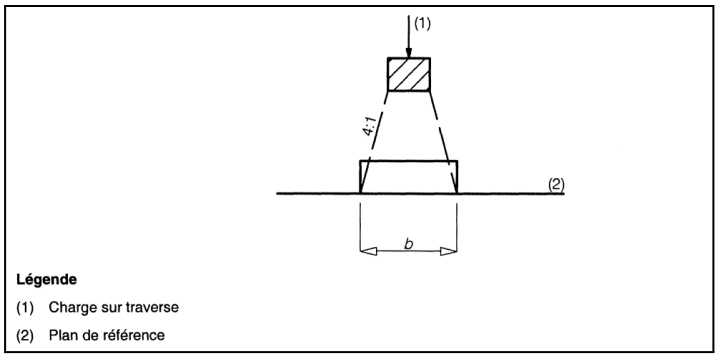


Figure IV.7 : Répartition longitudinale des charges par les traverses et le ballast

Pour le calcul global du pont, il suffit généralement de répartir uniformément les quatre charges ponctuelles du modèle UIC 71 sur une longueur de 6,4 m.

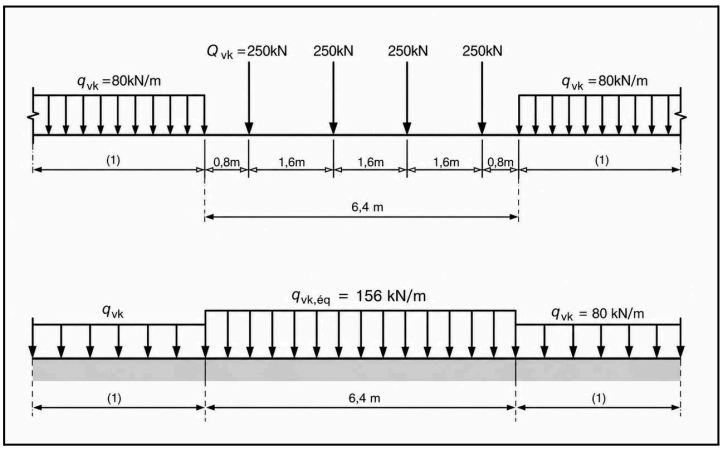


Figure IV.8 : Répartition longitudinale par le ballast des charges d'essieu du schéma de charge UIC 71.

➢ Effet dynamique (EN 1991-2 :2003 ; article 6.4)

Les effets dynamiques associés au transport ferroviaire découlent du déplacement des charges sur la structure. Ils intensifient les contraintes et les déformations dues à la vitesse des trains, à la succession des essieux susceptible de provoquer des phénomènes de résonance, ainsi qu'aux irrégularités de la voie ou du matériel roulant. Il est crucial de les considérer pour une évaluation réaliste du comportement de la structure.

La dynamique d'un pont ferroviaire est essentiellement influencée par la vitesse des trains, les caractéristiques structurelles (portée, poids, fréquences naturelles et amortissement), les propriétés du trafic (charges appliquées, distance entre les essieux).et la condition de la voie et des engins, y compris les irrégularités, les anomalies et les spécificités du système rail–traverse–ballast.

- Facteur dynamique (EN 1991-2 :2003 ; article 6.4.5)

On doit considérer le facteur dynamique ($\boldsymbol{\phi}$), qui amplifie les impacts des charges statiques pour les modèles de charge 71, SW/0 et SW/2, comme $\boldsymbol{\phi_2}$ ou $\boldsymbol{\phi_3}$.

En général, le facteur dynamique ($\boldsymbol{\phi}$) est pris égal à $\boldsymbol{\phi_2}$ ou $\boldsymbol{\phi_3}$, selon la qualité de l'entretien de la voie. En l'absence de précision, on adopte $\boldsymbol{\phi_3}$.

Le facteur dynamique (ψ) amplifie les efforts et vibrations dans la structure, mais ne tient pas compte des effets de résonance. Si les critères (exigences de l'analyse) ne sont pas respectés, il existe un risque de résonance ou de vibrations excessives, et une analyse dynamique doit être réalisée pour évaluer les effets d'impact et de résonance, notamment pour les trains à grande vitesse. Pour les ponts à plusieurs voies, le facteur dynamique ne doit pas être réduit.

Avec $L\boldsymbol{\phi}$: longueur "déterminante" définie au tableau 6.2 de l'EN 1991-2:

- **Tablier 01 : (45.00 m)**

La longueur déterminante est $L\boldsymbol{\phi}$= 44m

- Voie normalement entretenue :

$$\boldsymbol{\phi 3} = \frac{2{,}16}{\sqrt{L\boldsymbol{\phi}} - 0.2} + 0.73$$

Tel que $1{,}00 < \boldsymbol{\phi} 3 < 2 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{\phi 3} = \frac{2{,}16}{\sqrt{44} - 0.2} + 0.73 = 1.065$

- Voie soigneusement entretenue :

$$\boldsymbol{\phi 2} = \frac{1.44}{\sqrt{L\boldsymbol{\phi}} - 0{,}2} + 0.82$$

Tel que $1{,}00 < \boldsymbol{\phi 2} < 1{,}67 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{\phi 2} = \frac{1.44}{\sqrt{44} - 0{,}2} + 0.82 = 1.044$

- **Tablier 02 : (30.00 m)**

La longueur déterminante est $L\boldsymbol{\phi}$= 29 m

- Voie normalement entretenue :

$$\boldsymbol{\phi 3} = \frac{2{,}16}{\sqrt{L\boldsymbol{\phi}} - 0.2} + 0.73$$

Tel que $1{,}00 < \boldsymbol{\phi} 3 < 2 \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{\phi 3} = \frac{2{,}16}{\sqrt{29} - 0.2} + 0.73 = 1.146$

- Voie soigneusement entretenue :

$$\boldsymbol{\phi 2} = \frac{1.44}{\sqrt{L\boldsymbol{\phi}} - 0{,}2} + 0.82$$

Tel que $1{,}00 < \boldsymbol{\phi 2} < 1{,}67$ $\Rightarrow$ $\boldsymbol{\phi 2} = \frac{1.44}{\sqrt{29} - 0{,}2} + 0.82 = 1.097$

❖ Charges horizontales (EN 1991-2 :2003 ; article 6.5)

Les forces horizontales sont des mouvements parallèles à la surface du tablier, provoqués principalement par l'accélération et le ralentissement des trains, mais aussi par les efforts latéraux (forces centrifuges, interaction roue-rail). Il est essentiel de les considérer pour garantir la stabilité et la taille appropriée des supports de la structure.

➢ Forces centrifuges (EN 1991-2 :2003 ; article 6.5.1)

Puisque notre ouvrage comporte une courbure, il faut tenir compte de la force centrifuge et du dévers.

On considère que la force centrifuge agit horizontalement vers l'extérieur, à une hauteur de 1,80 m au-dessus du plan de roulement, elle doit toujours être associée aux charges de trafic vertical et n'est pas augmentée par les coefficients dynamiques.

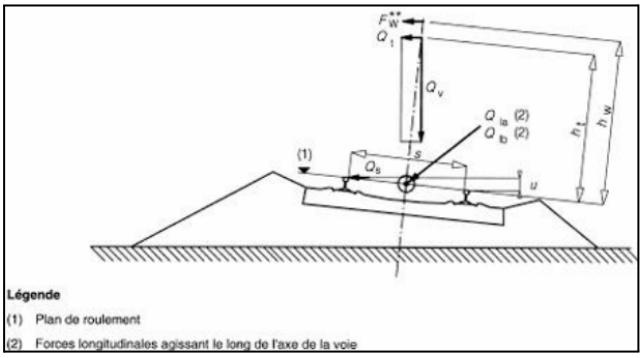


Figure IV.9 : Schéma propre à une voie ferrée avec courbure

La valeur caractéristique de la force centrifuge est calculée grâce aux équations ci-après :

$$Q_{tk} = \frac{v\hat{}\,2}{g \times r} \times (f \times Q_{vk}) = \frac{V\hat{}\,2}{127 \times r} \times (f \times Q_{vk})$$

$$q_{tk} = \frac{v\hat{}\,2}{g \times r} \times (f \times q_{vk}) = \frac{V\hat{}\,2}{127 \times r} \times (f \times q_{vk})$$

avec :

- **Qtk, qtk** : valeurs caractéristiques des forces centrifuges [kN, kN/m]

- **Avk, avk** : valeurs caractéristiques des charges verticales (sans majoration dynamique) pour les modèles 71, SW/2 et « train à vide »
- **f** : coefficient de réduction (f =1 pour V≤ 120 km/h pour le modèle de charge 71 et SW2 et « Train à vide ».)
- v : vitesse maximale [m/s]
- **V** : vitesse maximale [km/h] 220 km/h voyageur (160 Km/h marchandise)
- **g** : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)
- **r** : rayon de courbure [m]

Application numérique :

➔ Modèle de charge 71

$Q_{tk} = \frac{61.11\hat{}\,2}{9.81 \times 2700} \times (1 \times 250) = \frac{220\hat{}\,2}{127 \times 2700} \times (1 \times 250) = 35.26$ KN

$q_{tk} = \frac{61.11\hat{}\,2}{9.81 \times 2700} \times (1 \times 80) = \frac{220\hat{}\,2}{127 \times 2700} \times (1 \times 80) = 11.28$ KN/m

➔ Modèle de charge SW/2

$q_{tk} = \frac{80\hat{}\,2}{127 \times 2700} \times (1 \times 150) = 2.78$ KN/m

➔ Modèle de charge « Train à vide »

$q_{tk} = \frac{61.11\hat{}\,2}{9.81 \times 2700} \times (1 \times 10) = \frac{220\hat{}\,2}{127 \times 2700} \times (1 \times 10) = 1.41$ KN/m

➢ Effort de lacet (EN 1991-2 :2003 ; article 6.5.2)

L'effort de lacet doit être vu comme une force concentrée s'exerçant horizontalement au niveau supérieur des rails et de façon perpendiculaire à l'axe de la voie. Il doit être mis en œuvre aussi bien sur les lignes droites que sur les lignes courbes. Il faut considérer la valeur caractéristique de l'effort de lacet comme étant Qsk = 100 kN. Il n'est pas nécessaire de la multiplier par le coefficient dynamique ϕ, mais on peut l'adapter grâce au facteur α dans le cas où $\alpha \leq 1$. L'effort de lacet doit toujours être associé à une charge verticale de trafic.

➢ Actions dues au démarrage et au freinage (EN 1991-2 :2003 article 6.5.3)

Les forces de démarrage et de freinage exercent leur action au-dessus des rails, suivant l'orientation longitudinale de la voie. Il faut envisager ces charges comme des charges uniformément réparties sur la longueur d'influence $L_{a,b}$ associée à l'élément structurel examiné. Il faut que l'orientation de ces forces se conforme aux directions de circulation permises sur chaque voie.

Il ne faut pas multiplier les valeurs caractéristiques des forces d'accélération et de freinage par le coefficient dynamique ϕ. Le modèle de charge 71 peut être modifié par le facteur de réduction α dans le cas où α est inférieur ou égal à 1.

Les valeurs caractéristiques sont les suivantes :

Tablier 01 (45.00 m) :

- **Force de démarrage** :

Q_{lak} = 33 [kN/m] $L_{a,b}$ [m] ≼ 1000 [kN] pour les modèles de charges 71 et SW/2

Application numérique :

- Pour les modèles de charge 71:

Q_{lak} = 33 × 45 =1485 kN ≥ 1000 donc la valeur retenue est 1000 KN.

- Pour les modèles de SW/2 :

Q_{lak} = 33 × (45-7) =1254 kN ≥ 1000 donc la valeur retenue est 1000 KN.

- **Force de freinage:**

Q_{lbk} = 20 [kN/nl] $L_{a,b}$ [m] ≼ 6000 [kN] pour les modèles de charges 71

Q_{lbk} = 35 [kN/m] $L_{a,b}$ [m] pour le modèle de charge SW /2

Application numérique:

- Pour les modèles de charge 71:

Q_{lak} = 20 × 45 =900 kN < 6000 donc la valeur retenue est 900 KN.

- Pour les modèles de SW/2 :

Q_{lak} = 35 × (45-7)= 1330 kN < 6000 donc la valeur retenue est 1330 KN.

Tablier 02 (30.00 m)

- **Force de démarrage**:

Q_{lak} = 33 [kN/m] $L_{a,b}$ [m] ≼ 1000 [kN] pour les modèles de charges 71 et SW/2

Application numérique:

- Pour les modèles de charge 71:

Q_{lak} = 33 × 30 =990 kN < 1000 donc la valeur retenue est 990 KN.

- Pour les modèles de SW/2 :

Q_{lak} = 33 × (30-7) = 759 donc la valeur retenue est 759 KN.

- **Force de freinage :**

Q_{lbk} = 20 [kN/nl] $L_{a,b}$ [m] ≼ 6000 [kN] pour les modèles de charges 71

Q_{lbk} = 35 [kN/m] $L_{a,b}$ [m] pour le modèle de charge SW /2

Application numérique :

- Pour les modèles de charge 71:

Q_{lak} = 20 × 30=1000 kN = 600 donc la valeur retenue est 600 KN.

- Pour les modèles de SW/2 :

Q_{lak} = 35 × (30-7)=805 kN donc la valeur retenue est 805 KN.

➢ Déraillement (EN 1991-2 :2003 ; article 6.7)

Les constructions ferroviaires doivent être conçues de façon qu'en cas de déraillement, les dommages au pont (renversement ou effondrement global) soient minimes. La structure doit garantir la sécurité et empêcher que les efforts accidentels ne se propagent aux éléments voisins.

Le déraillement des trains sur un pont ferroviaire doit être vu comme une situation accidentelle de conception.

Il faut envisager deux cas :

- **Situation I :** les véhicules déraillés restent sur le tablier, retenus par le rail voisin ou muret.

  Il faut éviter l'effondrement d'une grande partie de la structure, mais des dommages locaux peuvent être tolérés.

  Les parties intéressées doivent être dimensionnées pour des charges concentrées dans l'état accidentel de valeur : α × 0.7 × LM71 (avec α = 1)

Application numérique:

Q_{A1d} =1× 0.7 × 250 = 175 kN

q_{A1D} = 1 × 0.7 × 80 = 56 *kN*/m

- **Situation II :** les véhicules déraillés sont en équilibre sur le bord du pont, sollicitant

le bord de la superstructure (hors éléments non structuraux tels que les passerelles).

Pour la Situation de Conception II, qui correspond au déraillement de véhicules ferroviaires restant en équilibre sur le bord du pont et sollicitant le bord de la superstructure (hors éléments non structuraux tels que les passerelles), l'ouvrage ne doit pas se renverser ni s'effondrer.

La stabilité globale est contrôlée pour une longueur maximale de 20m soumise à une charge verticale uniformément répartie : $\alpha \times 1{,}4 \times$ LM71 appliquée le long du bord de la charpente.

Application numérique:

$q_{A2D} = 1 \times 1.4 \times 80 = 112\ kN/\text{m}$

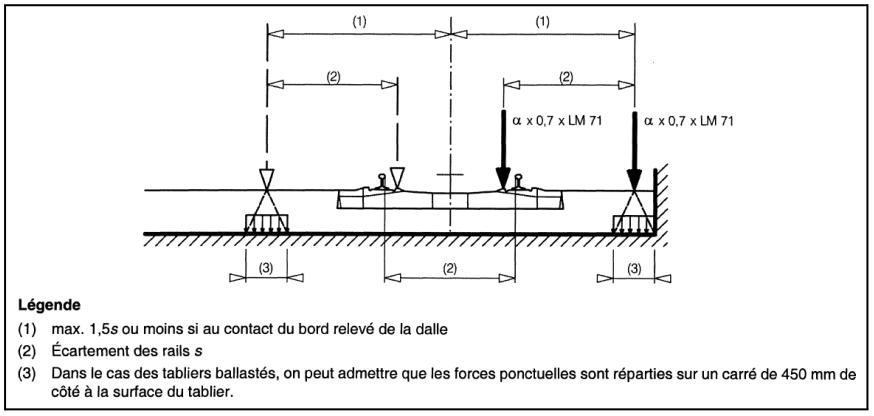


Figure IV.10 : Schéma montrant la situation de calcul 1

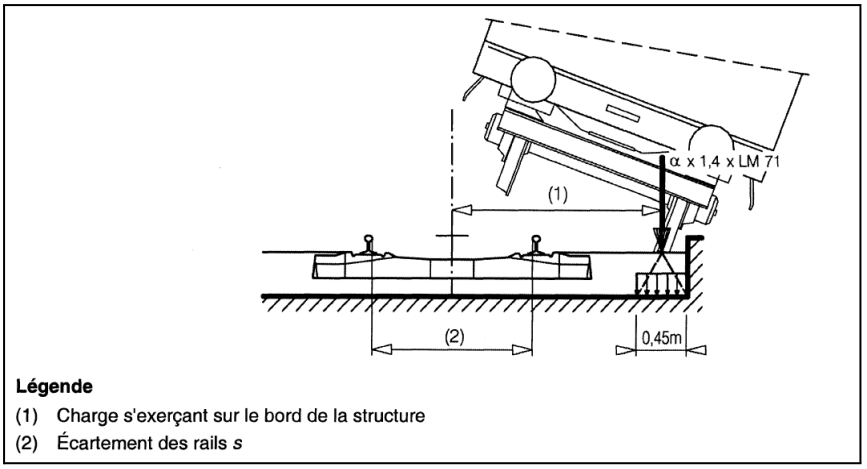


Figure IV.11 : Schéma montrant la situation de calcul 2

❖ Effets climatiques

Les sollicitations liées aux conditions climatiques comprennent celles causées par le vent, la pluie, la neige ou les variations de température. Il faut les considérer pour garantir la sécurité et la pérennité du pont.

➢ Effet du vent

Le dimensionnement doit tenir compte des forces générées par le vent sur le pont qui affectent sa stabilité.

Les actions dues au vent sont intégrées dans les calculs sous la forme de pressions statiques horizontales appliquées aux surfaces exposées. La valeur caractéristique de leur intensité est :

- 2,00 kN/m² pour les structures opérationnelles
- 1,25 kN/m² pour les structures actuellement en construction.

➢ Gradient thermique

Il est impératif de considérer un gradient thermique vertical homogène sur l'ensemble de la longueur de la structure, avec une fluctuation linéaire de température en fonction de la hauteur. On a opté pour le module instantané comme module d'élasticité du béton.

Le gradient est positif lorsque la fibre du haut est plus chaude que celle du bas.

puisque notre tablier est mixte (type 2) les valeurs du gradient thermique à considérer d'après le RCPR (article 3.1.2.2) sont données dans le tableau ci-après:

Tableau IV.5 : Gradient thermique $\Delta\theta$

type	gradient °C	
	en construction	en service
type 1	±15	±8

➢ Variation de la température

D'après le RCPR (article 3.1.2.1) , À moins d'instructions spécifiques du CCTP et en l'absence d'explications détaillées, nous appliquons les fluctuations de température uniformes en fonction de la région où est installé le projet, c'est à dire au niveau de Ksar El Boukhari dans la Wilaya de Médéa dans le centre-nord du pays.

Donc, vis-a-vis du climat, on la classe généralement dans la catégorie :Nord de l'Algérie (climat tempéré) pour des températures allant de - 15 °C à +35 °C.

IV.3- Application des charges de trafic sur les ponts ferroviaires

IV.3.1- Principes généraux

(EN 1991-2 :2003 ; article 6.8.1)

La structure doit être dimensionnée en prenant en compte le nombre maximal de voies pouvant être implantées, disposées dans la position la plus défavorable, indépendamment de la configuration réelle du projet, tout en respectant les exigences d'espacement minimal et de gabarit. L'évaluation des sollicitations se fonde sur la recherche systématique des effets les plus défavorables, en plaçant les charges de trafic et les efforts associés de manière critique, tout en négligeant toute action ayant un effet favorable sur la structure.

- Le modèle de charge 71 est utilisé en combinant une charge uniformément répartie sur les longueurs requises avec jusqu'à quatre charges concentrées par voie. Ces charges concentrées peuvent être placées sur une ou plusieurs voies pour obtenir les effets les plus défavorables.
- Le modèle SW/0 est appliqué une seule fois par voie. Il peut être positionné sur une ou plusieurs voies, selon la configuration qui génère les sollicitations maximales.
- Le modèle SW/2 s'applique à une seule voie à la fois. Il doit être combiné avec le modèle 71 ou SW/0 appliqué sur une autre voie, en fonction des cas les plus défavorables.
- Le modèle "train à vide" se compose d'une charge q_{vk} uniformément répartie seule. Il est appliqué sur des longueurs variables d'une voie afin de maximiser les effets. Ce modèle concerne principalement les structures à voie unique.

Enfin, pour les structures à poutres continues qui ont été dimensionnées en utilisant le modèle 71, il est nécessaire de procéder à une vérification complémentaire en utilisant le modèle SW/0. Cela permet de garantir la sécurité des structures à poutres continues pour toutes les différentes configurations de chargement.

IV.3.2- Groupes de charges - Valeurs caractéristiques de l'action multicomposante

(EN 1991-2 :2003 ; article 6.8.2)

Les combinaisons d'actions correspondent à la combinaison de plusieurs actions agissant simultanément sur une structure ferroviaire afin de représenter les conditions d'exploitation. Une action à plusieurs composantes combine les charges verticales, les efforts longitudinaux (accélération et freinage) et les efforts transversaux. Les valeurs caractéristiques de ces actions sont utilisées pour le dimensionnement sans application des coefficients de sécurité et sont combinées selon des règles précises pour obtenir les effets les plus défavorables.

On peut prendre certaines composantes à leur valeur maximale et réduire les autres, afin de tenir compte de la probabilité qu'elles coïncident. L'évaluation des sollicitations s'appuie sur une approche enveloppe, les charges étant positionnées pour créer les effets les plus pénalisants, toute contribution favorable étant négligée. Les modèles de charge (LM71,

SW/0, SW/2 ,train vide, effet de lacet, force de freinage,démarrage et centrifuge) sont combinés de façon cohérente afin de reproduire les conditions critiques.

En utilisant les groupes de charges adéquats à notre ouvrage, avec leurs valeurs caractéristiques, on garantit ainsi un dimensionnement sûr et réaliste des structures ferroviaires.

Ces groupes, décrits dans le tableau (6.11 de l'EN 1991-2), sont les suivants :

- pour une voie chargée : Gr 11-14 et Gr 16-17
- pour deux voies chargées : Gr 21-27

Tableau IV.6 : Groupes de charges du trafic ferroviaire

Nombre de voies sur l'ouvrage			Groupes de charges			Forces verticales			Forces horizontales			Remarques
			Référence EN 1991-2			6.3.2/6.3.3	6.3.3	6.3.4	6.5.3	6.5.1	6.5.2	
1	2	≥ 3	Nombre de voies chargées	Groupe de charge (8)	Voie chargée	LM 71 (1) SW/0 (1), (2) HSLM (6), (7)	SW/2 (1), (3)	Train à vide	Accélération, freinage (1)	Force centrifuge (1)	Effort de lacet (1)	
			1	gr 11	T_1	1			1 (5)	0,5 (5)	0,5 (5)	Max. vertical 1 et max. longitudinal
			1	gr 12	T_1	1			0,5 (5)	1 (5)	1 (5)	Max. vertical 2 et max. transversal
			1	gr 13	T_1	1 (4)			1	0,5 (5)	0,5 (5)	Max. longitudinal
			1	gr 14	T_1	1 (4)			0,5 (5)	1	1	Max. latéral
			1	gr 15	T_1			1		1 (5)	1 (5)	Stabilité latérale avec train à vide
			1	gr 16	T_1		1		1 (5)	0,5 (5)	0,5 (5)	SW/2 et max. longitudinal
			1	gr 17	T_1		1		0,5 (5)	1 (5)	1 (5)	SW/2 et max. transversal
			2	gr 21	T_1 T_2	1 1			1 (5) 1 (5)	0,5 (5) 0,5 (5)	0,5 (5) 0,5 (5)	Max. vertical 1 et max. longitudinal
			2	gr 22	T_1 T_2	1 1			0,5 (5) 0,5 (5)	1 (5) 1 (5)	1 (5) 1 (5)	Max. vertical 2 et max. transversal
			2	gr 23	T_1 T_2	1 (4) 1 (4)			1 1	0,5 (5) 0,5 (5)	0,5 (5) 0,5 (5)	Max. longitudinal
			2	gr 24	T_1 T_2	1 (4) 1 (4)			0,5 (5) 0,5 (5)	1 1	1 1	Max. latéral
			2	gr 26	T_1 T_2	1	1		1 (5) 1 (5)	0,5 (5) 0,5 (5)	0,5 (5) 0,5 (5)	SW/2 et max. longitudinal
			2	gr 27	T_1 T_2	1	1		0,5 (5) 0,5 (5)	1 (5) 1 (5)	1 (5) 1 (5)	SW/2 et max. transversal
			≥ 3	gr 31	T_i	0.75			0.75 (5)	0.75 (5)	0.75 (5)	Cas de charge supplémentaire

(1) Tous les coefficients appropriés (α, Φ, f, ...) doivent être pris en compte.
(2) SW/0 ne doit être pris en compte que pour les ponts à travées continues.
(3) SW/2 ne doit être pris en compte que si cela est stipulé pour la ligne considérée.
(4) Le coefficient peut être réduit à 0,5 si l'effet est favorable ; il ne peut être égal à zéro.
(5) Dans les cas favorables, ces valeurs non dominantes peuvent être prises égales à zéro.
(6) HSLM et trains réels lorsque les paragraphes 6.4.4 et 6.4.6.1.1 l'imposent.
(7) Si le paragraphe 6.4.4 impose une analyse dynamique ; voir également 6.4.6.5(3) et 6.4.6.1.2.
(8) Voir également Tableau A2.3 de l'EN 1990.

Action composante dominante selon le cas

À considérer lors du calcul d'une structure supportant une voie (groupes de charges 11-17)

À considérer lors du calcul d'une structure supportant deux voies (groupes de charges 11-27, sauf 15). Chacune des deux voies doit être considérée comme T_1 (voie 1) ou T_2 (voie 2)

À considérer lors du calcul d'une structure supportant trois voies ou plus ; (Groupes de charge 11 à 31, sauf 15). Chaque voie doit être considérée tour à tour comme T_1, n'importe quelle autre tour à tour comme T_2, toutes les autres étant considérées comme non chargées. En outre, le groupe de charges 31 doit être considéré comme un cas de charge supplémentaire dans lequel toutes les longueurs défavorables de la voie T_i sont chargées.

IV.3.3- Combinaisons de charges

Selon l'EN 1990, annexe A2, les actions doivent être combinées avec des coefficients partiels appropriés, étant donné que les valeurs maximales des différentes charges ne se produisent pas nécessairement en même temps. Cela conduit à un nombre très élevé de combinaisons possibles, surtout si l'on associe les différents groupes de charges (Gr22, Gr23, Gr26…) aux actions variables telles que le vent, la température, la neige ou le séisme, ce qui peut dépasser 200 scénarios.

Pour faciliter la lecture, nous nous contenterons dans ce chapitre de quelques combinaisons représentatives données à titre d'exemple. Le logiciel MIDAS réalise tous les calculs des combinaisons possibles, en suivant les formules de contrôle de l'aptitude au service et les règles de l'EN 1990, pour garantir une prise en compte complète et fiable des effets des actions.

Les combinaisons à utiliser varient selon l'état limite précisé :

- **État limite ultime (ELU) :** $\sum_{j \geq 1} \sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q$ avec $i>1$.

1.35G + 0.9T

1.35G +1.35 SW/2 + 0.9T

1.35G + 1.2 SW/2 + 1.45 UIC71 + 0.9T

1.35G + 1.45 (UIC71 + UIC71) $\pm$ 0. 9 T

- **État limite de service (ELS) :** $\sum_{j\geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum \Psi_{0,i} Q_{K,i}$ avec $i>1$.

Fréquent :

G + 0.6 T

G + 0.7 (UIC71 + SW/2) + 0.6 T

G + 0.7 (UIC71 + UIC71) + 0.6 T

Caractéristique :

G + T

G + UIC71 + SW/2 +T

G + UIC71 + UIC71 + T

La modélisation sur le logiciel MIDAS nous permet d'obtenir les résultats de calcul et cela suivant quatres phases:

1. phase 01 : On considère uniquement la structure métallique (n = ∞)
2. phase 02 : Bétonnage, mais on considère le béton comme charge seulement et non comme un élément structurel (n = 18)
3. phase 03 : La structure devient rigide, et les charges complémentaires sont appliquées (n = 15)
4. phase 04 : Mise en service (n = 6)

Tablier 01 (45.00 m)

Tableau IV.7 : Moment sollicitant chaque section durant les différentes phases de constructions

Phases de construction	Charge étudiée		Moment sollicitant (KN.m)		
			Section 01	Section 02	Section 03
phase 01	**Poutres et éléments métalliques**		2750.25	4687.85	5067.87
phase 02	**Béton frais**		12179.42	20481.72	22084.76
phase 03	**CCP + retrait**		29598.83	49648.29	53503.51
phase 04	**ELU**	**1.35G + 0.9T**	40548.17	67842.71	73051.77
		1.35G +1.35 SW/2 + 0.9T	58367.21	95984.50	101993.27

		1.35G + 1.2 SW/2 + 1.45 UIC71 + 0.9T	**62034.18**	**102978.55**	**110183.45**
		1.35G + 1.45 (UIC71 + UIC71) ± 0.9 T	55372.34	91901.64	98343.93
	ELS fréquent	**G + 0.6 T**	30030.88	50248.77	54107.06
		G + 0.7 (UIC71 + SW/2) + 0.6 T	41988.80	69714.85	74601.43
		G + 0.7 (UIC71 + UIC71) + 0.6 T	37187.37	61863.43	66317.07
	ELS caractéristique	**G + T**	30059.71	50279.31	54139.20
		G + UIC71 + SW/2 +T	**47156.86**	**78110.44**	**83439.22**
		G + UIC71 + UIC71 + T	40283.27	66871.67	71582.07

Tableau IV.8 : Effort tranchant sollicitant chaque section durant les différentes phases de constructions

Phases de construction	**Charge étudiée**		**Effort tranchant sollicitant (KN)**		
			Section 01	**Section 02**	**Section 03**
phase 01	**Poutres et éléments métalliques**		431.74	307.34	124.99
phase 02	**Béton frais**		1961.62	1293.25	498.96
phase 03	**CCP + retrait**		4783.45	3145.99	1222.81
phase 04	**ELU**	**1.35G + 0.9T**	6458.02	4247.53	1650.94

		1.35G +1.35 SW/2 + 0.9T	9877.78	6620.83	3151.3
		1.35G + 1.2 SW/2 + 1.45 UIC71 + 0.9T	**9994.39**	**6697.75**	**3160.18**
		1.35G + 1.45 (UIC71 + UIC71) ± 0.9 T	9314.02	6231.04	2901.5
	ELS fréquent	**G + 0.6 T**	4783.72	3146.32	1222.92
		G + 0.7 (UIC71 + SW/2) + 0.6 T	6794.13	4540.55	2085.52
		G + 0.7 (UIC71 + UIC71) + 0.6 T	6158.61	4102.64	1826.43
	ELS caractéristique	**G + T**	4783.71	3146.31	1222.92
		G + UIC71 + SW/2 +T	**7660.48**	**5139.60**	**2455.45**
		G + UIC71 + UIC71 + T	6752.6	4514.01	2085.33

Tablier 02 (30.00 m)

Tableau IV.9 : Moment sollicitant chaque section durant les différentes phases de constructions

Phases de construction	Charge étudiée		Moment sollicitant (KN.m)		
			Section 01	Section 02	Section 03
phase 01	**Poutres et éléments métalliques**		1005.51	1668.13	1810.96
phase 02	**Béton frais**		5245.28	8715.43	9409.79
phase 03	**CCP + retrait**		13083.88	21799.94	23488.23
phase 04	**ELU**	**1.35G + 0.9T**	17577.57	29411.87	31672.74
		1.35G +1.35 SW/2 + 0.9T	26517.65	44017.44	47073.19
		1.35G + 1.2 SW/2 + 1.45 UIC71 + 0.9T	**28060.23**	**46764.01**	**50237.60**
		1.35G + 1.45 (UIC71 + UIC71) ± 0.9 T	24985.35	41508.77	44523.51
	ELS fréquent	**G + 0.6 T**	13021.27	21786.45	23460.70
		G + 0.7 (UIC71 + SW/2) + 0.6 T	18835.46	31430.61	33747.09
		G + 0.7 (UIC71 + UIC71) + 0.6 T	16594.96	27622.38	29659.51
	ELS caractéristique	**G + T**	13027.16	21787.18	23464.22

		G + UIC71 + SW/2 +T	**21361.73**	**35628.66**	**38243.23**
		G + UIC71 + UIC71 + T	18136.46	30132.96	32326.00

Tableau IV.10 : Effort tranchant sollicitant chaque section durant les différentes phases de constructions

phases de construction	**charge étudiée**		**Effort tranchant sollicitant (KN)**		
			Section 01	**Section 02**	**Section 03**
phase 01	**Poutres et éléments métalliques**		228.39	160.11	68.69
phase 02	**Béton frais**		1253.38	843.06	350.66
phase 03	**CCP + retrait**		3134.31	2101.29	862.61
phase 04	**ELU**	**1.35G + 0.9T**	4248.65	2821.66	1153.04
		1.35G +1.35 SW/2 + 0.9T	6671.76	4593.86	2187.25
		1.35G + 1.2 SW/2 + 1.45 UIC71 + 0.9T	**6774.13**	**4668.19**	**2239.20**
		1.35G + 1.45 (UIC71 + UIC71) ± 0.9 T	6271.55	4313.25	2109.48
	ELS fréquent	**G + 0.6 T**	3113.29	2089.91	853.75
		G + 0.7 (UIC71 + SW/2) + 0.6 T	4571.76	3139.77	1463.16

		G + 0.7 (UIC71 + UIC71) + 0.6 T	4106.37	2809.99	1315.48
	ELS caractéristique	**G + T**	3113.26	2091.14	855.89
		G + UIC71 + SW/2 +T	**5201.69**	**3590.95**	**1726.48**
		G + UIC71 + UIC71 + T	4536.84	3119.83	1515.50

Conclusion :

La détermination des combinaisons de charges et la distinction entre charges permanentes et charges d'exploitation constitue une étape essentielle du dimensionnement d'un ouvrage. L'analyse permet d'identifier la configuration la plus défavorable sur laquelle tous les éléments structuraux de l'ouvrage seront vérifiés.

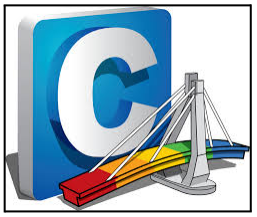
CHAPITRE V : CALCUL DU TABLIER MIXTE

V.1- Introduction

Dans ce chapitre, nous réalisons une analyse globale du tablier pour examiner les efforts mécaniques et leur répartition sous l'effet de diverses combinaisons de charges. En l'absence de logiciels permettant de modéliser la structure mixte dans sa globalité et d'intégrer les variations géométriques, nous avons choisi le logiciel MIDAS CIVIL 2022, dont la fiabilité et la précision sont avérées par la méthode des éléments finis (MEF). Chaque cas de chargement sera examiné individuellement, puis les sollicitations finales seront calculées par superposition des efforts obtenus, en tenant compte des coefficients d'augmentation pour chaque état limite. Cette approche permet de comprendre le comportement du tablier sous différentes sollicitations et d'assurer la stabilité et la durabilité de la structure.

Les résultats de l'analyse effectuée seront utilisés au cours du dimensionnement.

V.2- Présentation du logiciel MIDAS CIVIL 2022



MIDAS Civil 2022 est un logiciel de calcul avancé très utilisé dans le domaine du génie civil, notamment pour l'analyse et la conception des ouvrages d'art tels que les ponts. Développé par la société MIDAS IT, il permet de modéliser des structures complexes en intégrant les divers matériaux, les conditions de chargement et les différentes phases de construction.

Il permet d'effectuer différentes analyses (statique, dynamique, sismique) et tient compte des effets différés du béton, ce qui garantit une bonne précision des résultats en termes de contraintes et de déformations.

MIDAS Civil est surtout utilisé pour la conception et l'analyse de structures complexes. La modélisation se fait en plusieurs étapes : importation des sections, attribution des matériaux, modélisation par éléments barres, application des charges, définition des appuis et analyse des résultats.

Le logiciel permet également de simuler les étapes de construction et d'afficher graphiquement les résultats, ce qui facilite l'interprétation et l'optimisation du comportement de la structure.

V.3- Hypothèses de calcul

Pour l'étude du tablier mixte acier-béton, la vérification des poutres métalliques associées à la dalle est faite en adoptant un modèle de section mixte basé sur plusieurs hypothèses simplificatrices de calcul. On homogénéise le béton par rapport à l'acier à l'aide d'un coefficient d'équivalence qu'on note η, permettant de tenir compte de façon simplifiée des effets différés tels que le fluage. On considère que la liaison acier-béton est parfaitement rigide, aucun glissement relatif n'étant admis grâce aux connecteurs de cisaillement qui assurent la solidarité des deux matériaux.

De plus, l'acier et le béton sont modélisés comme des matériaux homogènes, isotropes, à comportement élastique linéaire, obéissant à la loi de Hooke, ce qui permet d'exprimer leurs déformations respectives par :

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma a}{Ea} \text{ et } \varepsilon_b = \frac{\sigma b}{Eb}$$

D'après la première hypothèse

$$: \eta = \frac{Ea}{Eb} = \frac{\sigma a}{\sigma b}$$

Le coefficient d'équivalence n n dépend donc du module d'élasticité du béton qui croît avec la résistance du béton et qui décroît quand la durée d'application des charges s'accroît.

Enfin, les calculs tiennent compte des différentes phases de fonctionnement de l'ouvrage, notamment avant et après la mise en œuvre de la dalle, afin d'évaluer correctement les contraintes et les déformations dans la section mixte.

V.4- Propriétées de la section combinée

- Coefficient d'équivalence (EN 1994-2; article 4.2.2)

Les coefficients d'équivalence varient selon les différentes phases de construction. Il est indispensable de les prendre en compte pour les vérifications à réaliser lors du montage de l'ossature métallique ainsi que pendant le bétonnage.

Tableau V.1 : Les valeurs de coefficient d'équivalence

Sollicitations	**Champ d'application**	**Coefficient d'équivalence** η
Poutre en acier	Charge permanente	∞
Charge instantané	Surcharge	6
Charge de longue durée	C.C.P.	18
Effets différées	Retrait	15

- Largeur efficace (EN 1994-2; article 4.2.2.2)

Afin de schématiser la collaboration entre les poutres en acier et la dalle en béton, il faut définir une section efficace, donnée par la largeur efficace de la dalle, correspondant à la partie réellement participante à la résistance.

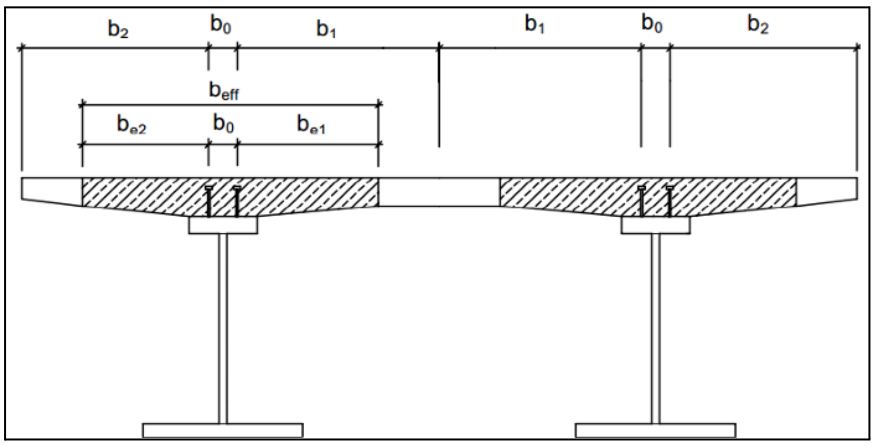


Figure V.1 : Définition de la largeur efficace

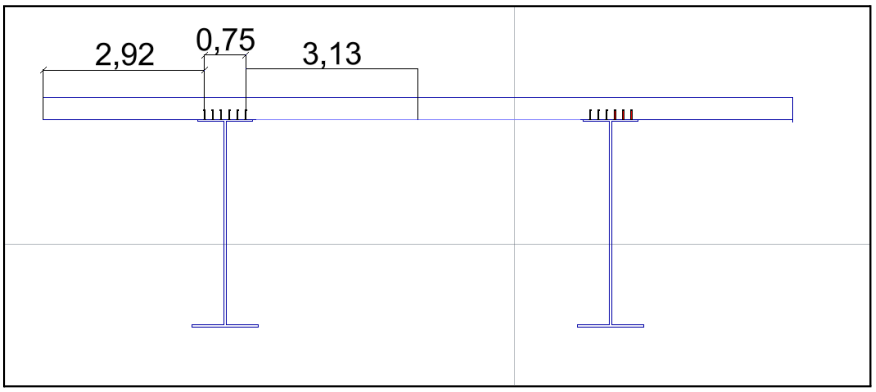


Figure V.2 : Valeurs de b_i

b_{ei} est la largeur efficace de la membrure en béton sur chaque côté de l'âme.

Pour les membrures mixtes, y compris les dalles mixtes, on peut supposer une largeur efficace constante sur la totalité de chaque portée égale à : $b_{eff} = b_0 + \beta_1 b_{e1} + \beta_2 b_{e2}$

Elle est prise égale à $\frac{Le}{8}$ sans toutefois dépasser la largeur géométrique, en résumé:

$$b_{ei} = \min\left\{\frac{Le}{8}, bi\right\}$$

Tel que :

Le : portée équivalente dans la section considérée (la distance approximative entre les points d'annulation des moments fléchissants.)

bi : est la largeur géométrique réelle de la dalle associée à la poutre maîtresse.

βi = 1 , Sauf Pour les sections transversales situées sur les appuis d'extrémité (βi = 0.55 + 0.025 ×Le/*bei* ≤ 1)

Les figures suivantes présentent la définition de la largeur efficace et comment se calcule selon l'Eurocode 4.

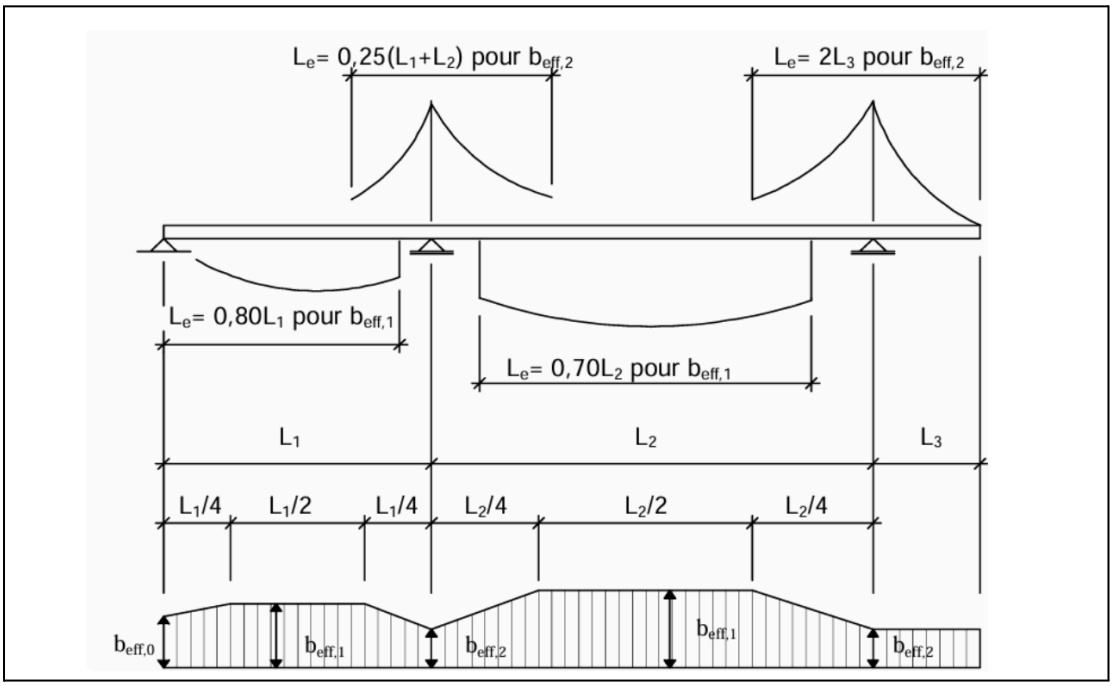


Figure V.3 : Calcul des portées équivalentes

b_0 : l'entraxe des goujons d'extrémités.

- On prend $b_0 = 0{,}75$ m.

Tablier 01 (45.00 m)

Pour L = 44m

- **Sur appuis**

Tableau V.2 : Calcul de la largeur efficace sur appuis du tablier 01

Paramètre	Procédé	Valeur (m)
b_0	-	0.75
L_e	$0.8 \times L1$	35.2
b_1	-	3.13
b_2	-	2.92
b_{e1}	$\min\left\{\frac{Le}{8}, b1\right\}=\min\left\{\frac{35.2}{8}, 3.13\right\}$	3.13

b_{e2}	$\min\left\{\frac{Le}{8}, b2\right\}=\min\left\{\frac{35.2}{8}, 2.92\right\}$	2.92
β_1	$0.55 + 0.025 \times L_e/b_{e1}$	0.83
β_2	$0.55 + 0.025 \times L_e/b_{e2}$	0.85
b_{eff}	$b_0 + \beta_1 b_{e1} + \beta_2 b_{e2}$	5.83

- **a mi-travée**

Tableau V.3 : Calcul de la largeur efficace à mi-travée du tablier 01

Paramètre	Procédé	Valeur (m)
b_0	-	0.75
L_e	$0.7 \times L_2$	30.8
b_1	-	3.13
b_2	-	2.92
b_{e1}	$\min\left\{\frac{Le}{8}, b1\right\}=\min\left\{\frac{30.8}{8}, 3.13\right\}$	3.13
b_{e2}	$\min\left\{\frac{Le}{8}, b2\right\}=\min\left\{\frac{30.8}{8}, 2.92\right\}$	2.92
b_{eff}	$b_0+b_{e2}+b_{e1}$	6.8

On considère une largeur efficace constante de $\boldsymbol{b_{eff}}$ = 6.8 m

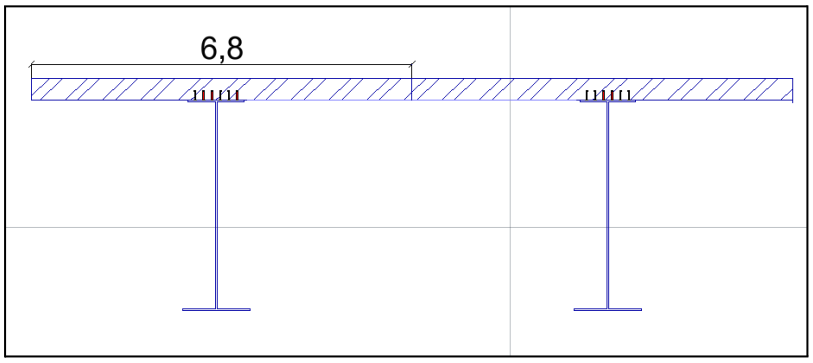


Figure V.4 : La largeur efficace

Tablier 02 (30.00 m)

Pour L = 29 m

- **Sur appuis**

Tableau V.4 : Calcul de la largeur efficace sur appuis du tablier 02

Paramètre	Procédé	Valeur (m)
b_0	-	0.75
L_e	$0.8 \times L1$	23.2
b_1	-	3.13
b_2	-	2.92
b_{e1}	$\min\left\{\frac{Le}{8}, b1\right\}=\min\left\{\frac{23.2}{8}, 3.13\right\}$	2.9
b_{e2}	$\min\left\{\frac{Le}{8}, b2\right\}=\min\left\{\frac{23.2}{8}, 2.92\right\}$	2.9
β_1	$0.55 + 0.025 \times L_e/b_{e1}$	0.75
β_2	$0.55 + 0.025 \times L_e/b_{e2}$	0.75

b_{eff}	$b_0 + \beta_1 b_{e1} + \beta_2 b_{e2}$	5.1

■ **A mi-travée**

Tableau V.5 : Calcul de la largeur efficace à mi-travée du tablier 02

Paramètre	Procédé	Valeur (m)
b_0	-	0.75
L_e	$0.7 \times L_2$	20.3
b_1	-	3.13
b_2	-	2.92
b_{e1}	$\min\left\{\frac{Le}{8}, b1\right\}=\min\left\{\frac{20.3}{8}, 3.13\right\}$	2.54
b_{e2}	$\min\left\{\frac{Le}{8}, b2\right\}=\min\left\{\frac{20.3}{8}, 2.92\right\}$	2.54
b_{eff}	$b_0+b_{e2}+b_{e1}$	5.83

On considère une largeur efficace constante de $\boldsymbol{b_{eff}}$= 5.83 m ≃ 6 m

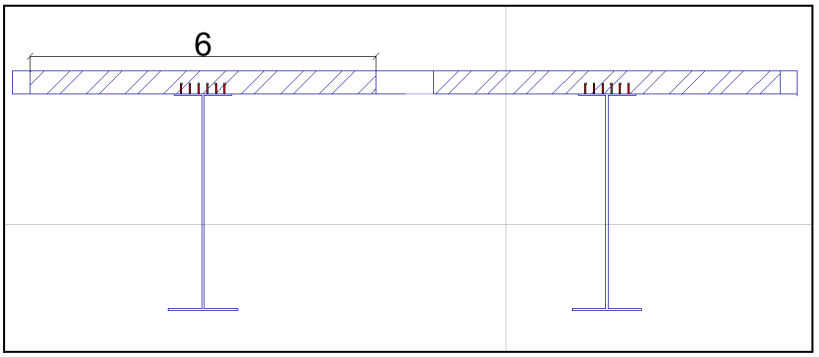


Figure V.5 : La largeur efficace

- Caractéristiques des sections

On présente la méthode et résultats de calculs des caractéristiques de la section mixte ci-dessous

- **Surfaces :** Pour le calcul des surfaces on utilise la loi :

$$S_n = S_a + \frac{Sb}{n}$$

Tel que :

S_a : section d'acier

S_b : section du béton

n : coefficient d'équivalence

- **Centre de gravité :** Pour déterminer le centre de gravité on utilise la loi suivante :

$$\int_s^s y \times ds = \int_{sb}^s yx\left(\frac{dSn}{n}\right) + \int_{sa}^s y \times dS_a = 0$$

Après simplification on obtient :

$$b \times \frac{Sb}{n} + a \times S_a = 0$$

$$a + b = 0$$

$$a_n = \frac{Sb \times C}{n \times Sn}$$

$$b_n = \frac{Sa \times C}{Sn}$$

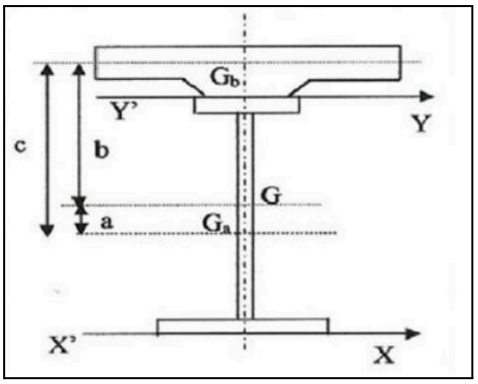


Figure V.6 : Centre de gravité d'une section mixte

- **Moment d'inertie :** Pour déterminer le d'inertie on utilise la loi suivante :

$$I = I_a + \frac{Ib}{n} + \frac{Sa \times Sb}{n \times S} \times C^2$$

Tel que :

I_a : moment d'inertie de la section d'acier.

I_b : moment d'inertie de la section du béton, égale à $0.036m^4$

S : Surface de la section mixte.

C: distance entre Y_{Gb} et Y_{Ga}.

Application numérique :

On résume les résultats des calculs effectués en utilisant les lois de calcul énoncées précédemment dans les tableaux suivants:

Tablier 01 (45.00 m)

- Caractéristiques pour les Charge permanente :

Tableau V.6 : Caractéristique de la section métallique

Caractéristiques pour n=∞				
	Notation	**Section 1**	**Section 2**	**Section 3**
Aire	A (m^2)	0.1809	0.2023	0.2237
Centre de gravité	V_s (m)	1.59	1.58	1.57
	V_i(m)	1.91	1.92	1.93
Moment d'inertie	I (m^4)	0.329	0.39	0.45

- Caractéristiques pour les surcharges (sollicitation instantanée) :

Tableau V.7 : Caractéristique de la section métallique

Caractéristiques pour n=6				
	Notation	**Section 1**	**Section 2**	**Section 3**
Aire	A (m^2)	0.63	0.65	0.677
Centre de gravité	V_S (m)	0.4	0.45	0.5
	V_i(m)	3.1	3.05	3

a	/ (m)	1.51	1.46	1.41
Moment d'inertie	I (m^4)	0.91	1.02	1.12

- Caractéristiques pour les C.C.P. (Charge de longue durée) :

Tableau V.8 : Caractéristique de la section métallique

Caractéristiques pour n=18				
	Notation	**Section 1**	**Section 2**	**Section 3**
Aire	A (m^2)	0.33	0.353	0.374
Centre de gravité	V_S (m)	0.95	1.01	1.06
	V_i(m)	2.55	2.49	2.44
a	/ (m)	0.96	0.9	0.85
Moment d'inertie	I (m^4)	0.69	0.777	0.85

- Caractéristiques pour les actions du retrait :

Tableau V.9 : Caractéristique de la section métallique

Caractéristiques pour n=15				
	Notation	**Section 1**	**Section 2**	**Section 3**
Aire	A (m^2)	0.36	0.383	0.405
Centre de gravité	V_S (m)	0.85	0.91	0.97
	V_i(m)	2.65	2.59	2.53
a	/ (m)	1.06	1	0.94
Moment d'inertie	I (m^4)	0.73	0.818	0.89

Tablier 02 (30.00 m)

On résume les résultats des calculs effectués en utilisant les lois de calcul énoncées précédemment dans les tableaux suivants :

- Caractéristiques pour les Charge permanente:

Tableau V.10 : Caractéristique de la section métallique

Caractéristiques pour n=∞				
	Notation	**Section 1**	**Section 2**	**Section 3**
Aire	A (m^2)	0.1509	0.1699	0.1937
Centre de gravité	V_s (m)	1.103	1.111	1.1108
	V_i(m)	1.397	1.389	1.3892
Moment d'inertie	I (m^4)	0.15	0.18	0.21

- Caractéristiques pour les surcharges (sollicitation instantanée) :

Tableau V.11 : Caractéristique de la section métallique

Caractéristiques pour n=6				
	Notation	**Section 1**	**Section 2**	**Section 3**
Aire	A (m^2)	0.6	0.62	0.64
Centre de gravité	V_S (m)	0.19	0.23	0.27
	V_i(m)	2.31	2.27	2.23
a	/ (m)	1.19	1.15	1.11
Moment d'inertie	I (m^4)	0.44	0.504	0.567

- Caractéristiques pour les C.C.P. (Charge de longue durée) :

Tableau V.12 : Caractéristique de la section métallique

Caractéristiques pour n=18				
	Notation	**Section 1**	**Section 2**	**Section 3**
Aire	A (m^2)	0.302	0.323	0.344
Centre de gravité	V_S (m)	0.59	0.64	0.69
	V_i(m)	1.91	1.85	1.81
a	/ (m)	0.79	0.74	0.69

Moment d'inertie	I (m^4)	0.345	0.385	0.429

- Caractéristiques pour les actions du retrait :

Tableau V.13 : Caractéristique de la section métallique

Caractéristiques pour n=15				
	Notation	**Section 1**	**Section 2**	**Section 3**
Aire	A (m^2)	0.332	0.353	0.375
Centre de gravité	V_S (m)	0.52	0.57	0.62
	V_i(m)	1.98	1.92	1.88
a	/ (m)	0.87	0.81	0.76
Moment d'inertie	I (m^4)	0.363	0.405	0.452

V.5- Vérification de la résistance des sections et de la sécurité structurelle (Eurocodes 3 et 4)

On passe à présent à la vérification de tous les éléments constitutifs du tablier, c'est-à-dire les poutres principales, les entretoises, la section mixte acier-béton ainsi que le hourdis. Ces vérifications sont faites à partir des résultats fournis par le logiciel de calcul, suivant les règles de calcul des structures mixtes.

À cet égard, il est nécessaire de vérifier les poutres mixtes afin de vérifier leur comportement sous les sollicitations appliquées. Il faut notamment vérifier :

- ➢ la capacité des sections à la flexion et à la traction
- ➢ la stabilité contre le renversement
- ➢ la résistance au renversement par cisaillement et aux charges agissant dans le plan des âmes
- ➢ la résistance au cisaillement longitudinal à l'interface acier-béton pour assurer la bonne interaction entre les deux matériaux.

Ces vérifications permettent de garantir la sécurité, la stabilité et la durabilité de l'ouvrage, en considérant les états limites ultimes (ELU) et de service (ELS).

- **Classification des sections**

L'EN 1993-1-1 : 2005 (article 5.5 Tableau 5.2) stipule que la classification des sections transversales a pour but de déterminer dans quelle mesure leur résistance et leur capacité de rotation sont influencées par le voilement local des éléments comprimés.

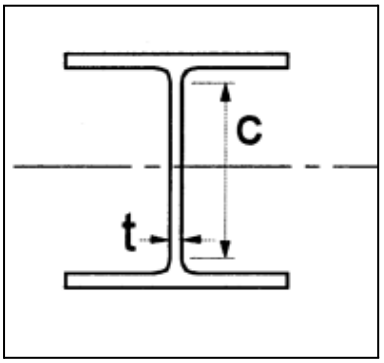


Figure V.7 : Coupe transversale de la paroi interne

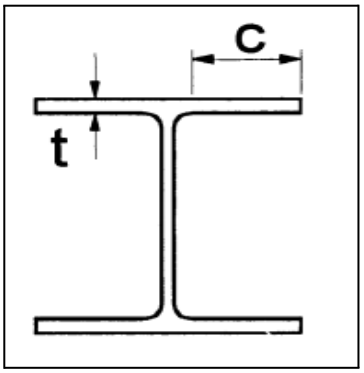


Figure V.8 : Coupe transversale de la paroi externe

Ainsi cette classification permet de distinguer le comportement des sections selon leur capacité d'atteindre la résistance plastique, de développer des redistributions d'efforts ou au contraire de se trouver limitées par un voilement prématuré. Il s'agit donc d'une étape essentielle dans le dimensionnement des structures en acier puisqu'elle conditionne les méthodes de calcul applicables ainsi que les vérifications à effectuer en résistance et en stabilité.

D'après l'Eurocode il existe 4 classes de sections, ces dernières sont définies comme suit :

Classe 1 : section transversale compacte, qui peut atteindre sa résistance plastique sans risque de voilement local. Sa ductilité est suffisante pour que puisse se former une rotule plastique prise en compte dans une analyse globale plastique de la structure.

Classe 2 : section transversale compacte pouvant atteindre sa résistance plastique sans flambage local, mais dont la capacité de rotation plastique est insuffisante pour permettre la formation d'une rotule plastique dans une analyse globale.

Classe 3 : section transversale susceptible d'atteindre sa résistance élastique, mais limitée avant d'atteindre la résistance plastique en raison du risque de voilement local des éléments comprimés.

Classe 4 : Section transversale élancée dont les parois sont sensibles au voilement local, ce qui empêche même d'atteindre la résistance élastique. On doit donc vérifier le comportement en tenant compte des effets de réduction dus au voilement.

On effectue la classification des sections de notre ouvrage dans le tableau ci-dessous:

Tablier 01 (45.00 m)

Tableau V.14 : Classification des sections

	C	t	C/t	ε	Condition de classification	Classe
Section 1	Semelle supérieure	0.03	16.66	0.82	$\frac{C}{t} > 14\ \varepsilon$	4
	Ame	0.03	114.33	0.82	$\frac{C}{t} > 124\ \varepsilon$	
	Semelle inférieure	0.04	15	0.82	-	
Section 2	Semelle supérieure	0.04	12.5	0.82	$\frac{C}{t} > 14\ \varepsilon$	4
	Ame	0.03	113.66	0.82	$\frac{C}{t} > 124\ \varepsilon$	
	Semelle inférieure	0.05	12	0.83	$\frac{C}{t} > 14\ \varepsilon$	
Section 3	Semelle supérieure	0.05	10	0.83	-	4
	Ame	0.03	113	0.82	$\frac{C}{t} > 124\ \varepsilon$	
	Semelle inférieure	0.06	10	0.83	$\frac{C}{t} < 14\ \varepsilon$	

Tel que :

f_y : limite d'élasticité

ε : coefficient dépendant de f_y

Le coefficient ε est calculé comme démontré dans le tableau suivant :

Tableau V.15 : Valeurs du coefficient ε

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

De la même manière on classifie les sections du **tablier 02 (30.00 m)** et on obtient les résultats suivants :

Tableau V.16 : Classification des sections

Section	Classe
01	4
02	4
03	4

En conclusion, nos sections sont toutes de la classe 4. Ce sont des sections données dont les profils élancés rendent ses parois susceptibles au voilement local, au point d'empêcher même d'arriver à la résistance élastique. Le voilement local précède donc l'atteinte de la limite d'élasticité dans une ou plusieurs parois de la section transversale. D'où la nécessité de faire toutes les vérifications au titre du "régime élastique", avec prise en compte des effets de réduction engendrés par le voilement.

- **Justification vis à vis des contraintes**

D'après l'Eurocode EN 1994-2 :2005, il est nécessaire de de justifier les efforts pour s'assurer que les efforts internes dans la structure n'excèdent pas les efforts résistants des matériaux.

La contrainte admissible du béton est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\sigma_{adm} = 0.6 \times f_{c28}$$

$$\sigma_{adm} = 0.6 \times 30 = 18 \text{ MPa}$$

La contrainte admissible de l'acier est donnée par le tableau suivant :

Tableau V.17 : Limite d'élasticité f_y en fonction de l'épaisseur des tôles

Epaisseur	$t \leq 16$ mm	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$63 < t \leq 80$	$80 < t \leq 100$	$100 < t \leq 150$
$f_y\,(MPa)$	355	345	335	325	315	295

Tableau V.18 : Contrainte admissible de chaque section

	Semelle supérieure		Ame		Semelle inférieure	
	t (mm)	Contrainte admissible (MPa)	t (mm)	Contrainte admissible (MPa)	t (mm)	Contrainte admissible (MPa)
Section 01	30	345	30	345	40	345
Section 02	40	345	30	345	50	335
Section 03	50	335	30	345	60	335

Note : ce tableau est valable pour les deux tabliers

1. Justification par rapport au moment fléchissant

D'après la classification effectuée dans le tableau **V.14**, les sections de notre ouvrage sont de classe 4, On se doit d'effectuer la justification en utilisant la loi suivante:

$$M_{Ed} \leq M_{c,rd}$$

$$M_{c,rd} = M_{eff,rd} = \frac{W \times fy}{\gamma M0}$$

Avec:

$W = \frac{I}{y}$

y : Vi pour les moments positifs et V_s pour les négatifs.

$\gamma_{M0} = 1$

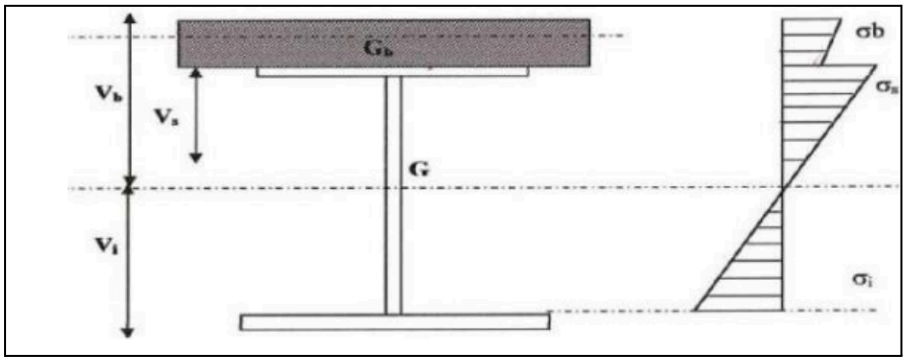


Figure V.9 : Distribution des contraintes dans la section transversale

2. Justification des contraintes du béton et de l'acier

➢ **Acier**

- fibre supérieure

$$\sigma_s = \frac{Vs \times M}{I}$$

- fibre inférieure

$$\sigma_i = \frac{Vi \times M}{I}$$

➢ **Béton**

$$\sigma_b = \frac{Vb \times M}{I} \times \frac{1}{n}$$

Note: Afin de pouvoir utiliser les équations de NAVIER, il est indispensable de tenir compte de l'homogénéité de la section

3. Justification par rapport au cisaillement

On se doit de vérifier la formule suivante :

$$V_{ed} \leq V_{pl,rd}$$

$$V_{pl,rd} = \frac{fy \times Av}{\gamma M0\sqrt{3}}$$

Avec :

$\gamma_{M0} = 1$: Coefficient partiel de sécurité

f_y : La résistance élastique de l'acier

A_v: aire de cisaillement (*)

(*) Pour les PRS : $A_v = (h - \sum t_f) \times t_w$

Tableau V.19 : Valeurs de l'aire de cisaillement

tablier	**01**			**02**		
A_v (m^2)	**S1**	**S2**	**S3**	**S1**	**S2**	**S3**
	0.1029	0.1023	0.1017	0.0729	0.0723	0.0717

4. Justification sous l'effet de l'interaction du moment fléchissant et effort tranchant M-V

Suivant l'article 6.2.2.4 de l'EN 1944-2 : 2005, lorsque $V_{ed} > 0.5 \times V_{pl,rd}$, il est nécessaire de prendre en compte son effet sur le moment résistant

5. Résultats

Les résultats des calculs sont présentés dans les tableaux suivantes:

5.1. Phase 01

➢ Tablier 01

Tableau V.20 : Vérifications et résultats 1.1

Vérification		Section 01	Section 02	Section 03	Statut
Moment fléchissant (KN.m)	$M_{c,rd}$	73455.97	87626.58	101751.5	**vérifié**
	M_{ED}	2750.25	4687.85	5067.87	
cisaillement (KN)	V_{ed}	431.74	307.34	124.99	**vérifié**
	$V_{pl,rd}$	21090.31	20967.34	20844.36	
Contraintes (KPa)	σ_i	15966.49	23078.64	21735.53	**vérifié**
	σ_s	13291.48	18991.80	17681.23	**vérifié**
	σ_b	0	0	0	**vérifié**

➢ Tablier 02

Tableau V.21 : Vérifications et résultats 1.2

Vérification		Section 01	Section 02	Section 03	Statut
Moment fléchissant (KN.m)	$M_{c,rd}$	38117,39	46004,31	53663,97	**Vérifié**
	M_{ED}	1005.51	1668.13	1810.96	
cisaillement (KN)	V_{ed}	228.39	160.11	68.69	**Vérifié**
	$V_{pl,rd}$	14941,54	14818,56	14695,59	
Contraintes (KPa)	σ_i	9364,64	12872,40	11979,93	**vérifié**
	σ_s	7393,85	10296,06	9579,11	**vérifié**
	σ_b	0	0	0	**vérifié**

5.2. Phase 02

➢ Tablier 01

Tableau V.22 : Vérifications et résultats 2.1

Vérification		Section 01	Section 02	Section 03	Statut
Moment fléchissant (KN.m)	$M_{c,rd}$	96058.82	110777.10	123668.03	**vérifié**
	M_{ED}	12179.42	20481.72	22084.76	
cisaillement (KN)	V_{ed}	1961.62	1293.25	498.96	**vérifié**

	$V_{pl,rd}$	21090.31	20967.34	20844.36	
Contraintes (KPa)	σ_s	16768.76	26623.6	27541.03	**vérifié**
	σ_i	45010.9	65636.4	63396.33	**vérifié**
	σ_b	1127.72	1771.97	1818.74	**vérifié**

➢ Tablier 02

Tableau V.23 : Vérifications et résultats 2.2

Vérification		**Section 01**	**Section 02**	**Section 03**	**Statut**
Moment fléchissant (KN.m)	$M_{c,rd}$	64123,04	73878,38	84140,88	**vérifié**
	M_{ED}	5245.28	8715.43	9409.79	
cisaillement (KN)	V_{ed}	1253.38	843.06	350.66	**vérifié**
	$V_{pl,rd}$	14941,54	14818,56	14695,58	
Contraintes (KPa)	σ_s	8970,18	14487,98	15134,62	**vérifié**
	σ_i	29039,08	41879,33	39700,97	**vérifié**
	σ_b	667,27	1068,99	1084,52	**vérifié**

5.3. Phase 03

➢ Tablier 01

Tableau V.24 : Vérifications et résultats 3.1

Vérification		Section 01	Section 02	Section 03	Statut
Moment fléchissant (KN.m)	$M_{c,rd}$	97792.45	112119.69	124881.42	**vérifié**
	M_{ED}	29598.83	49648.29	53503.51	
cisaillement (KN)	V_{ed}	4783.45	3145.99	1222.81	**vérifié**
	$V_{pl,rd}$	21090.31	20967.34	20844.36	
Contraintes (KPa)	σ_s	34464.39	55232.20	58312.81	**vérifié**
	σ_i	107447.8	157199.35	152094.24	**vérifié**
	σ_b	2838.24	4491.41	4689.07	**vérifié**

➢ Tablier 02

Tableau V.25 : Vérifications et résultats 3.2

Vérification		Section 01	Section 02	Section 03	Statut
Moment fléchissant (KN.m)	$M_{c,rd}$	65083,33	74882,81	85351,06	**vérifié**
	M_{ED}	13083.88	21799.94	23488.23	
cisaillement (KN)	V_{ed}	3134.31	2101.29	862.61	**vérifié**

	$V_{pl,rd}$	14941,54	14818,56	14695,58	
Contraintes (KPa)	σ_s	18757,07	30681,39	32218,36	**vérifié**
	σ_i	71421,16	103347,86	97694,40	**vérifié**
	σ_b	1731,42	2799,004	2840,75	**vérifié**

5.4. Phase 04

➢ Tablier 01

Tableau V.26 : Vérifications et résultats 4.1

Vérification		**Section 01**	**Section 02**	**Section 03**	**Statut**
Moment fléchissant (KN.m)	$M_{c,rd}$	104209.67	118721.67	132533.3	**vérifié**
	M_{ED}	62034.18	102978.55	110183.45	
cisaillement (KN)	V_{ed}	9994.39	6697.75	3160.18	**vérifié**
	$V_{pl,rd}$	21090.31	20967.34	20844.36	
	$\frac{Ved}{Vpl,rd}$	0.47	0.31	0.15	**interaction negligeable**
Contraintes (KPa)	σ_s	20728.29	34460.48	37249.65	**vérifié**
	σ_i	160644.24	233565.53	223497.91	**vérifié**

	σ_b	5182.07	8296.04	8691.58	**vérifié**

➢ Tablier 02

Tableau V.27 : Vérifications et résultats 4.2

Vérification		**Section 01**	**Section 02**	**Section 03**	**Statut**
Moment fléchissant (KN.m)	$M_{c,rd}$	67619,05	78819,38	90262,33	**vérifié**
	M_{ED}	28060.23	46764.01	50237.60	
cisaillement (KN)	V_{ed}	6774.13	4668.19	2239.20	**vérifié**
	$V_{pl,rd}$	14941,54	14818,56	14695,58	
	$\frac{Ved}{Vpl,rd}$	0.45	0.31	0.15	**interaction negligeable**
Contraintes (KPa)	σ_s	9224,38	16259,11	18211,06	**vérifié**
	σ_i	112149,0	160470,35	150409,88	**vérifié**
	σ_b	3155,71	5066,24	5283,45	**vérifié**

V.6- Retrait du béton

Selon l' Eurocode 2, le retrait est la diminution du volume du béton au fil du temps, quelles que soient les charges externes .

Parce qu'il est relié à l' acier, le béton d' une poutre mixte acier-béton ne peut pas rétrécir librement. Cette contrainte empêche son raccourcissement naturel et crée des contraintes internes d'auto-équilibrage dans la section.

Le retrait du béton est une déformation imposée εr, qui a trois causes principales :

- Retrait thermique ε_{th} (refroidissement après hydratation)
- Retrait endogène ε_{ca} (hydratation sans échange d'eau)
- Retrait de dessiccation ε_{cd} (perte d'humidité vers l'extérieur)

On peut écrire :

$$\boldsymbol{\varepsilon_r = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{ca} + \varepsilon_{cd}}$$

Le retrait peut varier en fonction de l' humidité ambiante , la taille de l' élément, la composition du béton , et des conditions de durcissement .

Dans les structures mixtes, il crée des contraintes de traction dans le béton, de compression dans l'acier, et peut conduire à des fissurations et à des déformations différées.

1. Retrait endogène

Le retrait endogène ε_{ca} est une contraction du béton provoquée par l'hydratation du ciment sans échange d'eau avec l'extérieur, particulièrement importante dans les bétons à faible rapport eau/ciment selon l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1, 3.1.4(6))
Afin de calculer le retrait, on établit le calcul suivant:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t).\ \varepsilon_{ca}(\infty)$$
$$\varepsilon_{ca}(\infty)=2.5 \text{ x } (f_{ck}\text{-}10) \text{ x } 10^{-6}$$
$$\beta_{as}(t)=1\text{-}e^{-0.2\sqrt{t}}$$

avec :
f_{ck}: résistance caractéristique à la compression sur cylindre, égale à 30 MPa
$\beta_{as}(t)$:*l'évolution de retrait en fonction de temps*.

Application numérique

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5 \text{ x } (f_{ck} - 10) \text{ x } 10^{-6} = 2.5 \text{ x } (30 - 10) \text{ x } 10^{-6}$$
$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 5 \text{ x } 10^{-5}$$
$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0.2\sqrt{28}}$$
$$\beta_{as}(t) = 0.65$$

Finalement on obtient :

$$\varepsilon_{ca}(t) = 0.65 \text{ x } 5 \text{ x } 10^{-5}$$
$$\varepsilon_{ca}(t) = 3.25 \text{ x } 10^{-5}$$

2. Retrait de dessiccation

Selon l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1, annexe B2), le retrait de dessiccation ε_{cd} correspond à la contraction du béton induite par la perte d'eau vers l'environnement (séchage) et dépend notamment de l'humidité relative et des dimensions de l'élément.
On calcule le retrait de dessiccation à l'aide de la formule:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t,t_s).\ k_h \varepsilon_{cd,0}$$

$$\beta_{ds} = \frac{t - ts}{t - ts + 0.04\sqrt{ho3}}$$

Tel que :

t : est l'âge du béton à l'instant considéré, en jours.

ts : est l'âge du béton (jours) au début du retrait de dessiccation (ou gonflement).En temps normal il correspond à la fin de la cure.

$\varepsilon_{cd,0}$: retrait de dessiccation de référence donné par la formule :

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \text{ x } [(220 + 110 \text{ x } \alpha_{ds1}) \text{ x e}^{-\propto ds2 \frac{fcm}{fcm0}}] \text{ x } 10^{-6} \text{ x } \beta_{RH}$$

$$\beta_{RH} = 1.55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH0}\right)^3\right]$$

RH_0 : 100 %

RH : l'humidité relative du projet, elle représente le rapport entre la résistance caractéristique du béton à la compression sur cylindre et sur cube, sa valeur sera donc de:

$$RH = \frac{30}{37} = 81\%$$

On obtient donc un coefficient β_{RH} de valeur :

$$\beta_{RH} = 1.55 \left[1 - \left(\frac{81}{100}\right)^3\right] = 0.72$$

f_{cmo} : valeur de résistance à la compression de référence, estimée à 10 MPa

f_{cm} : résistance moyenne en compression à 28 jrs

α_{dsi} : coefficients qui indiquent la rapidité de prise du ciment, on prend pour un ciment à prise normale (classe N) $\alpha_{ds1} = 4$ et $\alpha_{ds2} = 0.12$

Donc :

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \text{ x } [(220 + 110 \text{ x } \alpha_{ds1}) \text{ x e}^{-\propto ds2 \frac{fcm}{fcm0}}] \text{ x } 10^{-6} \text{ x } \beta_{RH}$$

k_h : coefficient en rapport avec le rayon moyen h_o, comme le montre le tableau suivant:

Tableau V.28 : Variation de k_h en fonction de h_0

h_0	100	200	300	⩾ 500
k_h	1	0.85	0.75	0.7

Le rayon moyen h_0 d la section transversale est calculé comme tel:

$$h_0 = \frac{2\,x\,Ac}{u}$$

A_c : Aire de la section du béton, sa valeur est de 2.72 m^2

u : Périmètre exposé à la dessiccation, sa valeur est calculée comme tel:

$$u = (6.8 + 0.4) \text{ x } 2$$
$$u = 14.4 \text{ m}$$

Par hypothèse, on pose l'âge du béton au commencement de la dessiccation t_s = 1 jour, donc:

$$h_0 = \frac{5.44}{14.4} = 0.37\text{m} \Rightarrow K_h = 0.73$$

$$\beta_{ds} = \frac{t - ts}{t - ts + 0.04\sqrt{ho3}} = 0.029$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \text{ x } [(220 + 110 \text{ x } \alpha_{ds1}) \text{ x } e^{-\propto ds2 \frac{fcm}{fcm0}}] \text{ x } 10^{-6} \text{ x } \beta_{RH} = 2.81 \text{ x } 10^{-4}$$

Application numérique:

$$\varepsilon_{cd}(t) = 5.7 \text{ x } 10^{-6}$$

3. Retrait de mise en service:

Le retrait de mise en service se calcule par la somme des retraits précédemment calculés.

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{ca}(t) + \varepsilon_{cd}(t) = 5.7 \text{ x } 10^{-6} + 3.25 \text{ x } 10^{-5} = 3.82 \text{ x } 10^{-5}$$

4. Retrait thermique:

D'après l'EN 1994-2, on doit tenir compte du retrait thermique résultant de la différence de température ΔT entre l'acier de charpente et le béton au moment du bétonnage.
La valeur de ΔT recommandée est de 20 °C, cependant, elle peut être modifiée au besoin.
Afin de calculer le retrait thermique on utilise la formule suivante :

$$\varepsilon_{th} = \alpha_{th}^{c}\,\Delta T = 2 \text{ x } 10^{-4}$$

tel que:
α_{th}^{c} : coefficient de dilatation thermique prit égale à 10^{-5}
On considère une réduction de 50% de l'effet thermique sur la section mixte.
Donc :

$$\varepsilon_{th} = \alpha_{th}^{c}\,\Delta T \text{ x } 0.5 = 10^{-4}$$

- **Bilan des retraits à court terme**

Le retrait thermique est appliqué sur la structure en même temps que le retrait $\varepsilon_{cs}(t)$

Le bilan sera donc :

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{ca}(t) + \varepsilon_{cd}(t) + \varepsilon_{th}(t) = 1.382 \text{ x } 10^{-4}$$

- **Bilan des retraits à long terme**

On estime l'âge du béton infini, ce qui fera tendre t vers l'infini dans tous les calculs précédemment effectués.

Donc on estime : $\beta_{ds}(\infty) = 1$ et $\beta_{ss}(\infty) = 1$

Et : $\varepsilon_{cs}(\infty) = \varepsilon_{ca}(\infty) + \varepsilon_{cd}(\infty) = \varepsilon_{ca}(\infty) + \beta_{ds}(\infty, ts) \text{ x } K_h \text{ x } \varepsilon_{cd.0}$

Avec des valeurs obtenues de :

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 5 \text{ x } 10^{-5}$$
$$\varepsilon_{cd}(\infty) = 0.7 \text{ x } 1 \text{ x } 2.81 \text{ x } 10^{-4} = 1.967 \text{ x } 10^{-4}$$

Donc :

$$\varepsilon_{cs}(\infty) = 2.467 \text{ x } 10^{-4}$$

Contraintes dues au retrait thermique

Le logiciel de modélisation MIDAS prend en considération les contraintes dues au retrait.

V.7- Entretoises

L'entretoise est une pièce mécanique destinée à garder une distance exacte entre deux éléments dans un assemblage. Elle assure le bon positionnement, la rigidité et la stabilité des pièces.

Notre ouvrage distingue plusieurs types d'entretoises, notamment :

➢ Tablier 01

1. entretoises espacées de 5m durant toute la longueur de l'ouvrage PRS 1500/2
2. entretoises de contreventement 2UPN 200
3. entretoises espacées de 5m et disposées en diagonale de l'ouvrage 2UPN 200
4. entretoises d'about PRS 2000

➢ Tablier 02

1. entretoises courantes espacées de 5m durant toute la longueur de l'ouvrage HEB 800/2
2. entretoises de contreventement UPN 200
3. entretoises espacées de 5m et disposées en diagonale de l'ouvrage UPN 200
4. entretoises d'about HEB 1000

1. Vérification des entretoises :

1.1. Entretoises d'about

Les dispositifs d'appui transmettent les charges tout en permettant les rotations de l'ouvrage. Il faut les remplacer parce qu'elles ont une durée de vie limitée, et on le fait au moyen de vérins hydrauliques qui soulèvent le pont temporairement.

On dépose les vérins à une distance de 1.5m des appuis, comme montré dans la figure ci dessous

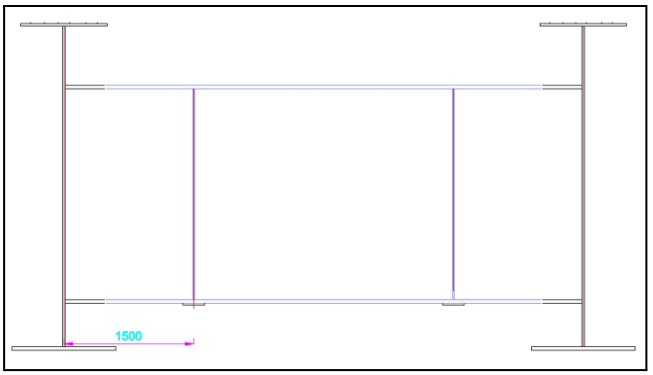


Figure V.10 : Disposition des vérins hydrauliques

L'entretoise subit l'effort tranchant maximum dû aux charges permanentes.

Midas Civil a permis d'obtenir les réactions maximales aux appuis suivantes :

➢ Tablier 01:

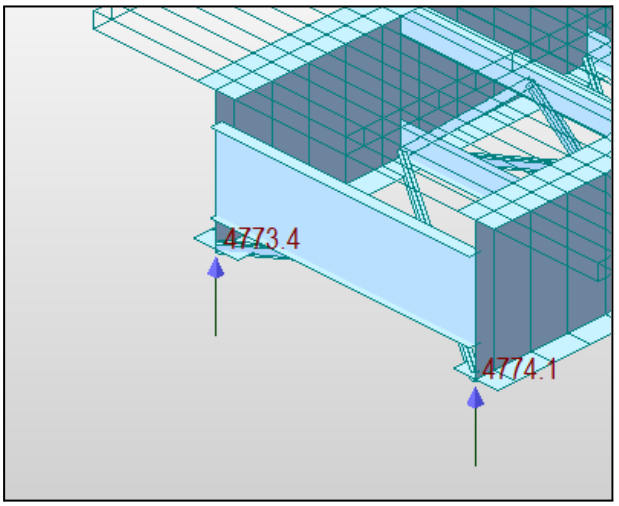


Figure V.11 : Réactions d'appuis 01

Donc :

V_{ELU} = 1.35 x 4774.1 = 6445.035 KN

M_{ELU} = 1.5 x 6445.035 = 9667.55 KN.m

On vérifie à présent la contrainte de cisaillement:

$$\tau = \frac{Ve}{hw\ x\ tw} = \frac{6445.035}{3.43\ x\ 0.03} = 62633.96\ \text{KPa} < 0.6 \text{ x } f_e = 0.6 \text{ x } 500000 = 300000\ \text{KPa}$$

La condition est **vérifiée.**

➢ Tablier 02 :

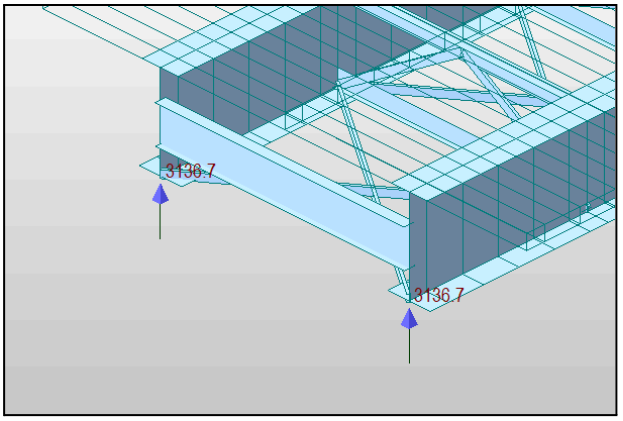


Figure V.12 : Réactions d'appuis 02

Donc:

V_{ELU} =1.35 x 3136.7 = 4234.545 KN

M_{ELU} = 1.5 x 4234.545 = 6351.818 KN.m

On vérifie à présent la contrainte de cisaillement:

$$\tau = \frac{Ve}{hw\ x\ tw} = \frac{4234.545}{2.43\ x\ 0.03} = 58087.04 \text{ KPa} < 0.6 \text{ x } f_e = 300000 \text{ KPa}$$

La condition est **vérifiée.**

V.8- Vérification de la flèche à L'ELS (EN 1990 Annexe A2, A.2.4.4.2.3)

La flèche de notre pont ferroviaire doit être limitée pour garantir la sécurité des trains et des voyageurs, éviter le déraillement, préserver la stabilité de la voie et assurer le confort des passagers.

On vérifie la flèche avec la formule suivante : $\delta_{adm} \leq \frac{l}{600}$

➢ Tablier 01 $\delta_{adm} \leq \frac{45}{600} = 0.075$m

➢ Tablier 02 $\delta_{adm} \leq \frac{30}{600} = 0.05$ m

En se fiant au logiciel MIDAS on trouve que la flèche due aux charges permanentes de la structure est:

➢ Tablier 01 : δ = 68.09 mm

➢ Tablier 02 : δ = 26.55 mm

On impose donc une contre flèche δ_{cf}=δ pour chacun des deux tabliers

On vérifie maintenant la flèche à l'ELS en se fiant aux résultats obtenus grâce au logiciel MIDAS

- ➢ Tablier 01 : δ_{els} = 101.3 mm
- ➢ Tablier 02 : δ_{els} = 29.45mm

En tenant compte à présent de la contre flèche imposée on trouve

- ➢ Tablier 01 : δ_{els} = 33.21mm < 75 mm
- ➢ Tablier 02 : δ_{els} = 2.9 mm < 50 mm

La flèche est **vérifiée.**

V.9- Vérification de la stabilité au voilement des âmes

Le voilement désigne un phénomène d'instabilité qui se produit dans les éléments minces soumis à la compression ou au cisaillement. L'élément se déforme hors de son plan avant d'atteindre sa résistance maximale et perd alors de sa capacité portante.

Dans la construction métallique, les poutres possèdent généralement une âme mince, qui peut se voiler sous des efforts de compression ou de cisaillement trop élevés.

Pour pallier ce phénomène, deux solutions principales existent :

- augmenter l'épaisseur de la plaque
- ajouter des raidisseurs de plaque judicieusement placés pour accroître la rigidité.

On décide de munir cet ouvrage de raidisseurs transversaux chaque 5m et des raidisseurs longitudinaux à mi-hauteur de l'âme.
L'épaisseur du raidisseur soit au moins égale à 80 % de celle de l'âme.

$$tr \geq 0{,}8 \times tw$$
$$tr \geq 0{,}8 \times 0.03 = 0.024 \text{ m}$$

On prendra des raidisseurs d'épaisseurs tr = 2.5 cm

- Définition des types de voilement

- Voilement par compression (voilement local): une plaque mince, soumise à une compression uniforme, au-delà d'une certaine charge, se déforme en « cloques ». On a là une instabilité locale provoquée par des efforts de compression excessive, confinée à une partie de la section (âme ou semelle).

- Voilement par cisaillement: il s'agit d'un « panneau » d'âme compris entre deux raidisseurs transversaux. Sous l'effet de la charge tranchante (V), deux diagonales apparaissent : l'une en traction et l'autre en compression. La diagonale en compression provoque le voilement, les cloques obliques, le gondolement de l'âme.

- **Vérifications** (EN 1993-1-5 :2006 article 5.1)

On propose des raidisseurs transversaux chaque 5m, et un raidisseur longitudinal a mi-hauteur de la poutre le long de la section 01

Pour déterminer le risque de voilement on vérifie la relation :

$$\frac{hw}{tw} < 31\ \varepsilon \sqrt{k\tau}\ \text{x}\ \frac{1}{\eta}$$

Avec :

t_w : épaisseur de l'âme

$\varepsilon = 0.82$

La valeur $\eta = 1{,}20$ est recommandée pour les nuances d'acier jusqu'à S460 compris.

k_τ : coefficient de voilement par cisaillement.

a : espacement libre des raidisseurs intermédiaires (transversaux).

➢ Tablier 01

$$\frac{a}{hw} = \frac{5}{1.715} = 2.915 > 1$$

$$k_\tau = 4.1 + \left[\frac{6.3+0.18\ x\ \frac{Isf}{hwxt^3}}{(\frac{a}{hw})^2}\right] + 2.2\sqrt[3]{\frac{Isf}{hwxt^3}} = 6.41 \text{ (annexe A.3)}$$

Avec:

I_{sf}: inertie du raidisseur par rapport à z-z

Donc :

$$\frac{hw}{tw} = 57.16$$

$$\frac{hw}{tw} > 31\ \varepsilon \sqrt{k\tau}\ \text{x}\ \frac{1}{\eta} = 51$$

→ Condition satisfaite, l'âme risque de voiler.

Il convient de vérifier la relation :

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3}\gamma_{M1}}$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3}\gamma_{M1}}$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37{,}4 t \varepsilon \sqrt{k_\tau}}$$

Où :

$\bar{\lambda}$: élancement

χ_w: contribution de l'âme

$$\bar{\lambda} = 0.603 < \frac{0.83}{\eta} \Rightarrow \chi_w = 1.2 \Rightarrow V_{bw,Rd} = 12.65 \text{ MN}$$

$$V_{ed} = 6.77413 < 12.65 \text{ MN}$$

→ Condition satisfaite, l'âme ne risque **pas** de voiler.

➢ Tablier 02

$$\frac{a}{hw} = \frac{5}{1.215} = 4.11 > 1$$

$$k_{\tau} = 5.34 + 4\,x\left[\frac{1}{(\frac{a}{hw})^2}\right] + k_{\tau sl} = 5.93$$

$$k_{\tau sl} = 9\,(\frac{hw}{a})^2\sqrt[4]{\frac{lsf}{hwt^3}} = 0.35$$

Donc :

$$\frac{hw}{tw} = 40.5$$

$$\frac{hw}{tw} < 31\ \varepsilon\ \sqrt{k\tau}\ \text{x}\ \frac{1}{\eta} = 51.58$$

Condition satisfaite, l'âme ne risque **pas** de voiler.

V.10- Vérification au déversement

La semelle est solidairement connectée à la dalle en béton par des connecteurs et les poutres sont entretoisés tous les 5 mètres par des profilés normalisés. On peut dire donc qu.il n'y a pas de risque de déversement des poutres métalliques.

V.11- Connecteurs

V.11.1- Définition

Un connecteur dans un pont est une pièce mécanique qui relie les différentes parties de la structure pour assurer la transmission des efforts et leur fonctionnement solidaire.

On utilise les goujons : Nelson ST37 3K.

leurs caractéristiques sont :

- Hauteur de h = 180mm
- Diamètre d = 22mm.
- Limite élastique f_u = 450*Mpa*.
- Résistance fc28 = 30 MPa.

➢ **Résistance à la rupture de l'acier par cisaillement :**

La résistance caractéristique est calculée par la formule:

$$P_{Rk}{}^{1} = 0{,}8 \times f_U \times \frac{\pi d2}{4}$$

$$P_{Rk}{}^{1} = 0{,}8 \times 450 \times \frac{\pi(0.022)2}{4} = 136{,}77\ \text{KN}$$

➢ **Résistance à l'écrasement du béton :**

La résistance caractéristique est calculée par la formule:

$$P_{Rk}{}^2 = 0.29 \times \alpha \times d^2 \sqrt{fck \times Ecm}$$

avec (d'après l'EN 1994-2 article 6.6.3.1) :

$$\alpha = 0{,}2\left(\frac{h_{sc}}{d} + 1\right) \qquad \text{pour } 3 \le h_{sc}/d \le 4$$

$$\alpha = 1 \qquad \text{pour } h_{sc}/d > 4$$

d : le diamètre de la tige du goujon, 16 mm ≤ d ≤ 25 mm

h_{sc} : est la hauteur nominale hors-tout du goujon.

$$\frac{180}{22} = 8.18 \Rightarrow \alpha = 1$$

$$P_{Rk}{}^2 = 0.29 \times 1 \times (0.022)^2 \sqrt{30 \times Ecm}$$

$$P_{Rk}{}^2 = 0.29 \times 1 \times (0.022)^2 \sqrt{30 \times 34179.56 \times 10^6} = 142.13 \text{ KN}$$

La résistance caractéristique d'un goujon s'écrit alors : $P_{Rk} = \min (P_{Rk}{}^1 ; P_{Rk}{}^2) = 136{,}77$KN

Finalement on obtient :

- a l'ELU : $P_{RD}{}^{ELU} = 0.8 \times 136{,}77 = 109.416$ KN
- a l'ELS : $P_{RD}{}^{ELS} = K_s \, x = 0.6 \times 136{,}77 = 82.062$ KN

V.11.2- Flux de cisaillement

Le flux de cisaillement se calcul comme suit :

$$V_{L,ED} = \frac{\mu c \, Ved}{Im}$$

tel que :

μ_c : le moment statique de la dalle

$$\mu_c = \frac{100 \times A\,(Y - Yg)}{1000000}$$

I_m : le moment d'inertie de la section mixte

V_{Ed} : l'effort tranchant

Le flux de l'effort tranchant doit vérifier la condition suivante :

$$V_{L,ED} \leq \frac{N}{L} \times P_{RD}$$

Donc, le nombre de goujons s'obtient en appliquant :

$$\frac{1}{PRD} \times L \times V_{L,ED} \leq N$$

On fait les calculs à L'ELS et L'ELU pour les deux tabliers:

➢ Tablier 01

- L'ELS

Tableau V.29 : Flux de cisaillement et disposition des goujons 1.1

	Section 01	**Section 02**	**Section 03**
Aire de la dalle (mm^2)	2720,000	2720,000	2720,000
Centre de gravité de la dalle y (m)	3.7	3.7	3.7
Centre de gravité de la section mixte y_g (m)	3.1	3.05	3
μ_c (x 10^6 mm^3)	163.2	176.8	190.4
Moment d'inertie de la section mixte I_m (m^4)	0.91	1.02	1.12
V_{ED}	7660.48	5139.60	2455.45
$V_{L,ED}$	1373.835	890.864	417.426
L	1	1	1
P_{RD}	82.062	82.062	82.062
N	16.74	10.85	5.08

Nombre de goujons retenu	18	12	12
Disposition utilisée	3 rangées de 6	2 rangées de 6	2 rangée de 6
Espacement longitudinal (cm)	33.33	50	50

- L'ELU

Tableau V.30 : Flux de cisaillement et disposition des goujons 1.2

	Section 01	**Section 02**	**Section 03**
Aire de la dalle (mm^2)	2720,000	2720,000	2720,000
Centre de gravité de la dalle y (m)	3.7	3.7	3.7
Centre de gravité de la section mixte y_g (m)	3.1	3.05	3
μ_c **($\times 10^6$ mm^3)**	163.2	176.8	190.4
Moment d'inertie de la section mixte I_m (m^4)	0.91	1.02	1.12
V_{ED}	9994.39	6697.75	3160.18
$V_{L,ED}$	1792.4	1160.94	537.23
L	1	1	1
P_{RD}	109.416	109.416	109.416
N	16.381	10.61	4.91
Nombre de goujons retenu	18	12	12
Disposition utilisée	3 rangées de 6	2 rangées de 6	2 rangée de 6
Espacement longitudinal (cm)	33.33	50	50

➢ Tablier 02

■ L'ELS

Tableau V.31 : Flux de cisaillement et disposition des goujons 2.1

	Section 01	**Section 02**	**Section 03**
Aire de la dalle (mm^2)	2720,000	2720,000	2720,000
Centre de gravité de la dalle y (m)	2.7	2.7	2.7
Centre de gravité de la section mixte y_g (m)	2.31	2.27	2.23
μ_c **($\times 10^6$ mm^3)**	106	116	127
Moment d'inertie de la section mixte I_m (m^4)	0.44	0.504	0.567
V_{ED}	5201.69	3590.95	1726.48
$V_{L,ED}$	1241.64	833.32	389.26
L	1	1	1
P_{RD}	82.062	82.062	82.062
N	15.13	10.15	4.74
Nombre de goujons retenu	16	12	12
Disposition utilisée	3 rangées de 6	2 rangées de 6	2 rangée de 6
Espacement longitudinal (cm)	33.33	50	50

- L'ELU

Tableau V.32 : Flux de cisaillement et disposition des goujons 2.2

	Section 01	**Section 02**	**Section 03**
Aire de la dalle (mm^2)	2720,000	2720,000	2720,000
Centre de gravité de la dalle y (m)	2.7	2.7	2.7
Centre de gravité de la section mixte y_g (m)	2.31	2.27	2.23
μ_c (x 10^6 mm^3)	106	116	127
Moment d'inertie de la section mixte I_m (mm^4)	0.44	0.504	0.567
V_{ED}	6774.13	4668.19	2239.20
$V_{L,ED}$	1633.18	1083.31	504.86
L	1	1	1
P_{RD}	109.416	109.416	109.416
N	14.92	9.9	4.6
Nombre de goujons retenu	15	10	12
Disposition utilisée	3 rangées de 6	2 rangées de 6	2 rangée de 6
Espacement longitudinal (cm)	33.33	50	50

V.11.3- Vérifications des espacement vis-a-vis des dispositions constructives

Le respect de certaines règles précises garantit une bonne pose des goujons, un enrobage suffisant et une liaison solide entre la poutre métallique et la dalle en béton.

➢ **Espacements longitudinaux**

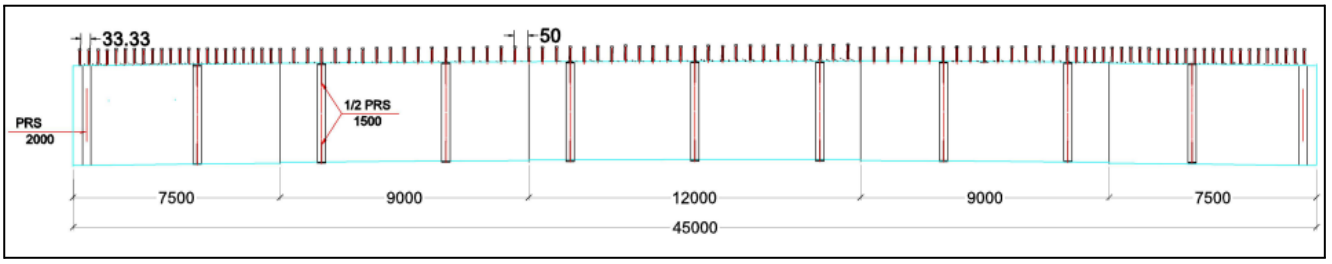


Figure V.13 : Disposition longitudinale des goujons du tablier 01

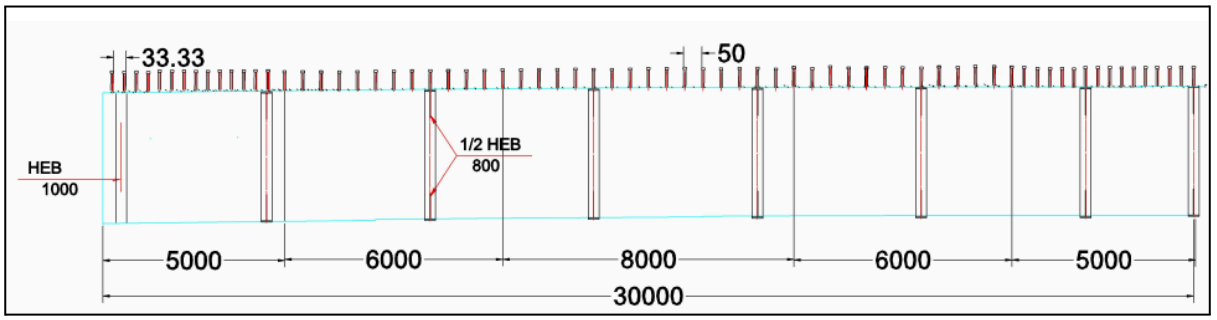


Figure V.14 : Disposition longitudinale des goujons du tablier 02

La condition est donnée comme tel : $5 \times d \leq S_1 \leq 800$ mm

Tableau V.33 : Vérification de la condition dans le sens longitudinal

	5d (mm)	S_1 (mm)	Condition
Section 01	110	333.33	**vérifiée**
Section 02	110	500.00	**vérifiée**
Section 03	110	500.00	**vérifiée**

➢ **Espacements transversaux**

On propose une disposition de 6 fils de goujons tout au long de la semelle supérieure espacés de 15 cm (pour les 2 tabliers) comme montré dans figure ci-dessous:

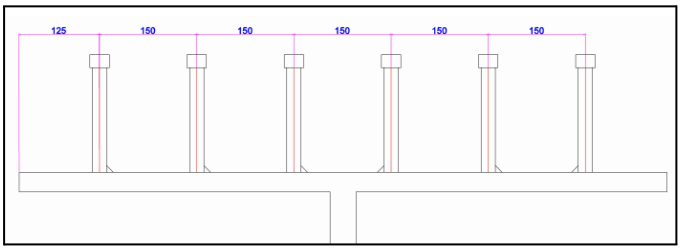


Figure V.15 : Disposition transversale des goujons

Les conditions sont comme tel :

- $2.5 \times d \leq S_2 \Rightarrow 2.5 \times 22 = 55 \leq 150$ mm : la condition est **vérifiée**
- $e_v \geqslant 50$ mm $\Rightarrow 125$ mm $\geqslant 50$ mm : la condition est **vérifiée**
- $e_d \geqslant 50$ mm $\Rightarrow 125$ mm $\geqslant 50$ mm : la condition est **vérifiée**

V.12- Étude de la dalle

V.12.1- Dimensions de la dalle

Une dalle est un élément plat, en béton le plus souvent, qui sert à porter et à transmettre les charges aux poutres.

La dalle de notre ouvrage a pour caractéristiques :

- Longueur : 465m
- épaisseur : 0.4 m
- Largeur :
  - dalle centrale : 7m (Condition d'appuis : doublement appuyée)
  - dalle de rive (02) : 3.3m (Condition d'appuis: encastré d'un seul côté seulement)

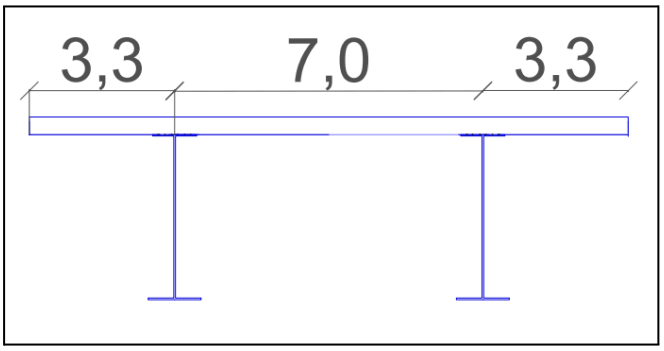


Figure V.16 : Disposition de la dalle

D'après le BAEL : étude de la dalle en béton armé, il faut commencer par établir la catégorie de notre dalle en calculant le rapport $\frac{lx}{ly}$

Où :

l_x : petit côté de la dalle et l_y : grand côté de la dalle

Tableau V.34 : Classification du sens de travail de la dalle

Dalle	l_x	l_y	$\frac{lx}{ly}$	Intervalle	Catégorie
Centrale	7	465	0.015	≤ 0.04	Dalle travaillant dans un seul sens
De rive	3.3	465	0.007	≤ 0.04	Dalle travaillant dans un seul sens

On conclut du tableau que notre dalle travaille dans le sens transversal, donc yy

V.12.2- Ferraillage de la dalle

Pour le ferraillage on utilise la combinaison qui engendre le moment fléchissant le plus défavorable, c'est-a-dire:

- ELS : G + UIC71 + SW/2 +T
- ELU : 1.35G + 1.2 SW/2 + 1.45 UIC71 + 0.9T

La répartition des efforts se fait à partir du logiciel ROBOT EXPERT. (Le calcul se fait sous M_{yy})

- **Ferraillage longitudinal**

En supposant que la dalle travaille dans un seul sens (le sens transversal comme démontré précédemment), le ferraillage longitudinal est estimé à 1% de la section transversale de la dalle (d'après le Livret 2.01 article 4a 5.1)

Donc: $A_{dalle} = 5.44\ m^2 \Rightarrow A_s = 544\ cm^2 = 40\ cm^2/ml$

On choisit une disposition de 5HA32/ml

- **Ferraillage Transversal**
  - Ferraillage de la dalle centrale :

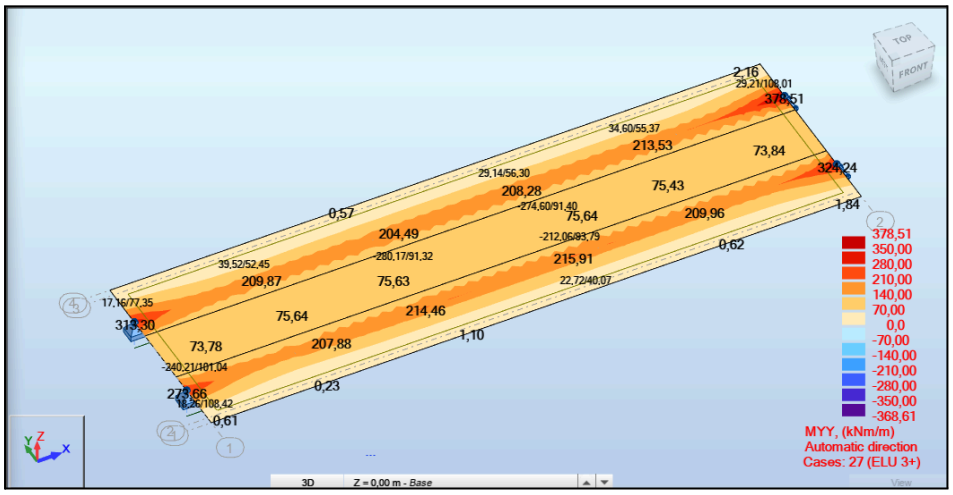


Figure V.17 : Cartographie du moment Myy^{+} a L'ELU

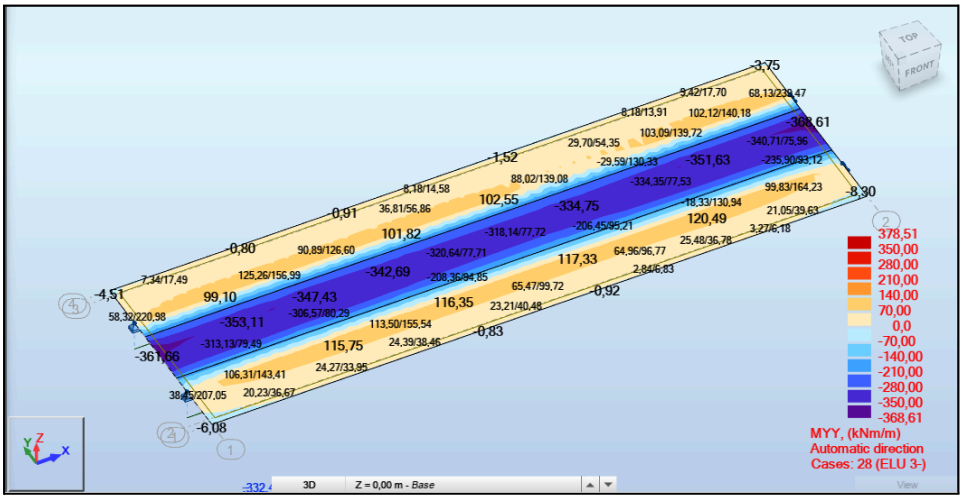


Figure V.18 : Cartographie du moment Myy^{-} a L'ELU

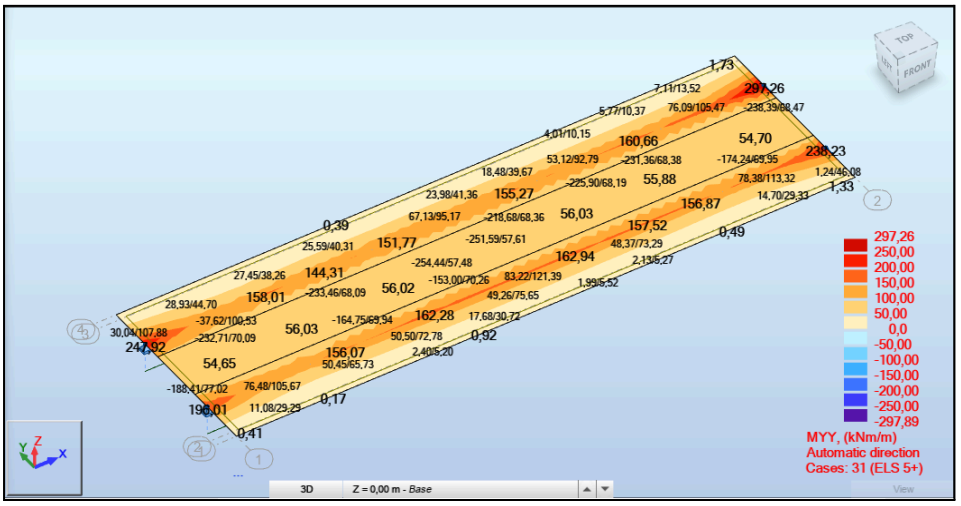


Figure V.20 : Cartographie du moment Myy^{+}a L'ELS

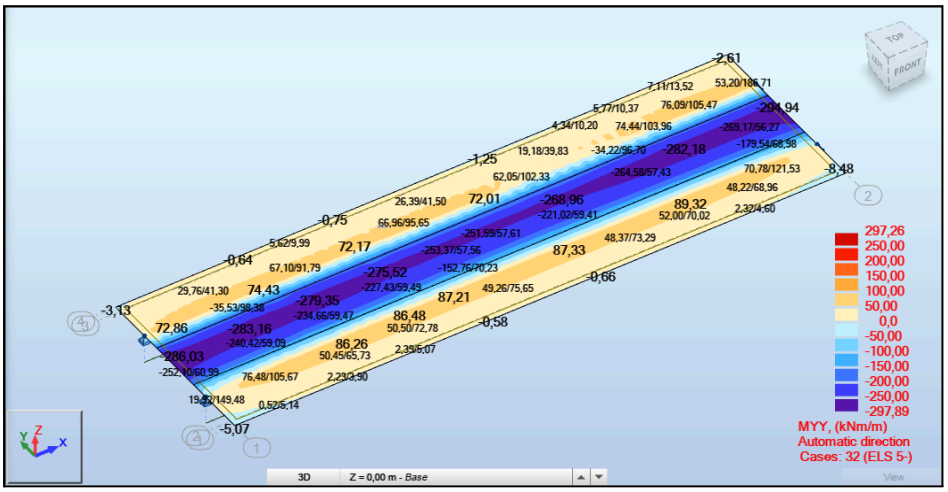


Figure V.20 : Cartographie du moment Myy^{-}a L'ELS

Tableau V.35 : Ferraillage de la dalle centrale

	Ferraillage transversal			
	Nappe inférieure		**Nappe supérieure**	
	ELS	**ELU**	**ELS**	**ELU**
Moment (KN.m/ml)	280	350	162.94	213.53
Section d'armatures (cm^2)	25.3		14.8	
Barres	9HA20		5HA20	

- Ferraillage de la dalle en porte-à-faux :

On utilise la combinaison de déraillement 1.35G + LM71 (déraillé).

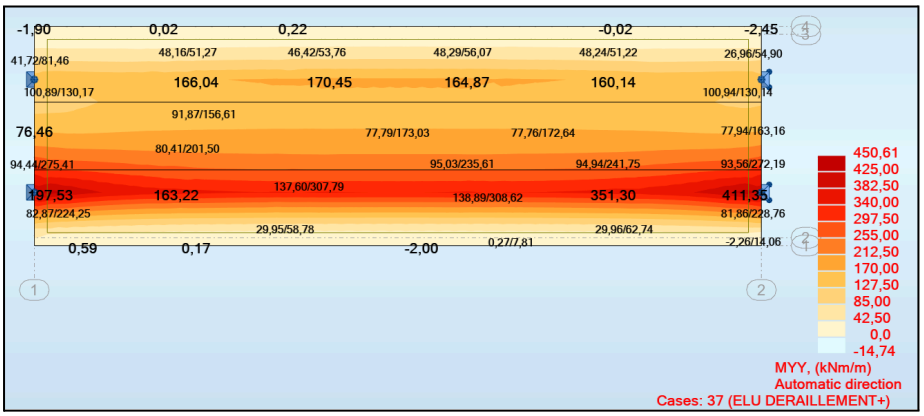


Figure V.18 : Cartographie du moment M_{yy} à L'ELU en situation de déraillement

Tableau V.36 : Ferraillage de la dalle en en porte-à-faux

	Ferraillage transversal
	Nappe supérieure
Moment (KN.m/ml)	450.61
Section d'armatures (cm^2)	33.8
Barres	7HA25

Vérification de la condition de non fragilité

La condition est donnée comme suit :

$$A > A_{min} = 0.23 \times b \times d \times \frac{ft28}{fe}$$

$$A_{min} = 0.23 \times 0.9 \times 0.4 \times \frac{2.22}{500} = \mathbf{3.67\ cm^2}$$

→ La condition est **vérifiée.**

V.13- Assemblages

V.13.1- Types d'assemblages

On assemble les pièces métalliques principalement par soudage ou par boulonnage. La soudure assure une liaison continue et rigide qui convient très bien en atelier pour obtenir précision et qualité, mais le boulonnage se met en place rapidement et commodément sur le chantier.

Les assemblages constituent des éléments importants pour la solidité des structures métalliques et sont bien souvent les maillons les plus fragiles. Elles doivent être conçues avec précision et réalisées avec soin. En pratique, on soude donc en atelier et on boulonne sur le chantier, assurant ainsi une transmission directe des efforts par des assemblages simples et efficaces.

En ce qui concerne les poutres en PRS (poutre reconstituée soudée/ par soudage) on utilise le soudage, et cela par fusion des bords des pièces à assembler, ce qui provoque une interpénétration aux dimensions microscopiques. Ainsi, le cordon de soudure assure une continuité métallurgique entre les éléments.

V.13.2- Catégories d'assemblages soudés

Il y a 3 catégories d'assemblages soudées :

- Les assemblages bout à bout (pièces continues)
- Les assemblages en T (pièces croisées)

- Les assemblages à clin ou par recouvrement (les pièces superposées)

Ces assemblages sont réalisées par 4 type de soudures :

- Soudure bout à bout
- Soudure d'angle
- Soudure en entailles
- Les soudures en bouchon

V.13.3- Soudage effectué

➢ Au niveau de l'âme

Le joint d'âme est une jonction soudée reliant bout à bout deux tôles plates verticales, assurant la continuité et la transmission des efforts, et il est généralement caractérisé par un chanfrein en X (double V) pour des épaisseurs > 15 mm.

On choisit un angle de 50° ± 5° et un espacement d'environ 9 mm.

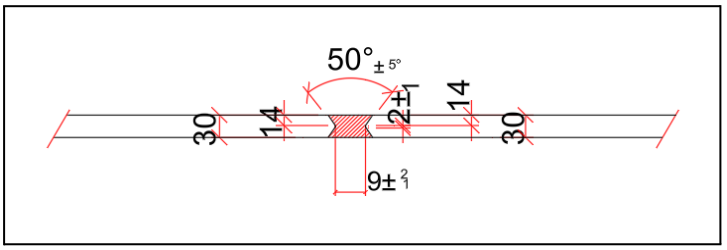


Figure V.17 : Détail de la soudure de l'âme

➢ au niveau des semelles

Le joint de semelles est une soudure reliant bout à bout deux tôles horizontales, qui assure la continuité des efforts, avec un chanfrein en X (pour épaisseur > 15 mm), un angle de 60° ± 5°, et un contrôle par essais destructifs et non destructifs (CND) pour garantir la qualité.

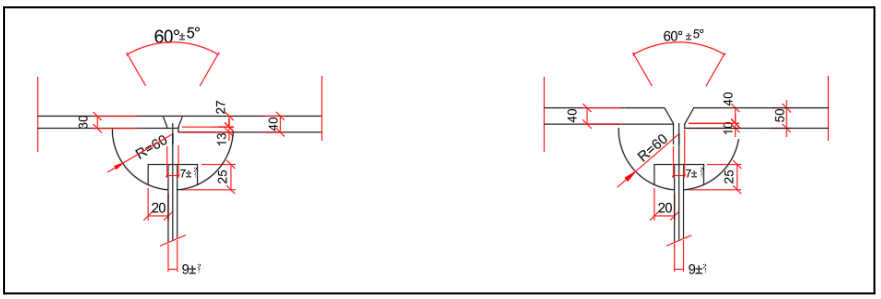


Figure V.18 : Détail de la soudure des semelles supérieures

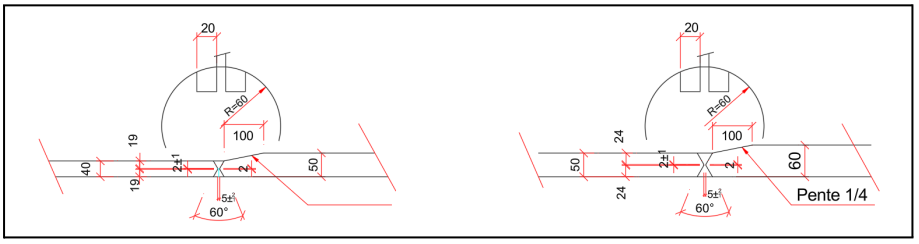


Figure V.19 : Détail de la soudure des semelles inférieures

V.13.4- Contrôle des soudures

Il est plus que conseillé de contrôler les joints soudés afin de garantir la qualité des assemblages. Différentes méthodes permettent de détecter et d'évaluer les défauts (présence, nombre, taille), elles se répartissent en deux grandes catégories :

➢ Contrôles destructifs

Les contrôles destructifs sont des essais réalisés pour vérifier la qualité et la résistance d'un assemblage en allant jusqu'à sa dégradation ou sa rupture. Ils sont principalement effectués sur des éprouvettes et servent à valider les procédés de soudage. Ces essais impliquent la destruction partielle ou totale de l'échantillon afin d'analyser précisément son comportement.

➢ Contrôles non-destructifs (CND)

Les essais non destructifs sont des méthodes de contrôle qui vérifient la qualité d'un assemblage sans endommager la structure, ils détectent les défauts tout en laissant la pièce utilisable.

Voici les méthodes les plus courantes :

- L'examen visuel : permet de repérer les défauts de surface visibles à l'œil nu, comme les fissures.
- La radiographie détecte les défauts internes comme les porosités ou les inclusions de laitier. Cependant, elle est moins efficace pour les fissures parallèles aux rayons.
- Les ultrasons: essai adapté à la détection des défauts internes, comme les fissures ou les défauts de liaison. Les ultrasons mesurent bien la taille et l'emplacement des défauts, mais les ultrasons demandent une grande expertise, car les échos parasites compliquent l'interprétation.

CHAPITRE VI : LES ÉQUIPEMENTS DE L'OUVRAGE

VI.1- Introduction

Dans la conception des ouvrages d'art, les équipements d'un pont sont essentiels pour assurer la sécurité, le bon fonctionnement et la durabilité de la structure. Ils assurent l'interface entre le tablier et son environnement en permettant la transmission des charges, l'accompagnement des mouvements (dilatation, retrait) et l'évacuation des eaux.

Ils assurent également la continuité de la circulation et la protection des usagers et facilitent l'entretien de l'ouvrage. Dans ce chapitre, nous allons voir comment sont dimensionnés les principaux éléments du tablier, les appareils d'appui et les joints.

VI.2- Les appareils d'appuis

Les tabliers de pont sont le plus souvent posés sur leurs appuis au moyen d'appareils d'appui qui constituent des éléments essentiels au bon fonctionnement de l'ouvrage. Ils servent principalement à transmettre les efforts verticaux et horizontaux de la superstructure aux piles et aux culées, en laissant au tablier la liberté de rotation et de translation.

Ces dispositifs mécaniques, disposés entre le tablier et les appuis, assurent la transmission des charges permanentes (poids propre) et des charges d'exploitation (routières ou ferroviaires). Ils accompagnent en même temps les déformations de la structure dues aux variations de température, au retrait, au fluage ou encore aux effets des charges mobiles, évitant ainsi l'apparition de contraintes excessives.

Différents types d'appareils d'appuis

On distingue plusieurs types d'appareils d'appui, selon leur conception et les mouvements qu'ils autorisent, et leur choix conditionne directement le comportement des ouvrages d'art. Les appuis frettés en élastomère sont les plus utilisés, car ils permettent de faibles rotations et des déplacements horizontaux tout en étant simples d'entretien. Les appuis à pot sont réservés aux structures les plus sollicitées car ils peuvent transmettre des efforts plus importants et accepter des rotations plus élevées, tandis que les appuis à rotule et les appuis glissants (type Téflon–acier inoxydable) sont destinés aux grandes rotations ou aux déplacements importants.

Le choix et le dimensionnement doivent prendre en compte les efforts et les déplacements afin d'assurer la durabilité de l'ouvrage. Le guide du SETRA préconise les appuis en élastomère fretté jusqu'à 12 MN (à l'ELU) alors qu'au-delà de 20 MN, les appuis à pot sont à privilégier pour limiter l'encombrement et garantir un fonctionnement fiable.

VI.3- Choix de l'appareil d'appui

Nous avons choisi des appuis à pot pour leur capacité à reprendre des charges importantes et pour leurs performances dans des conditions de sollicitation variées.

Ces dispositifs sont constitués par un pot métallique dans lequel on place un coussin en élastomère, confiné, qui est comprimé par un piston qui joue le rôle de couvercle et transmet

les efforts. Sous cette contrainte, l'élastomère, dont le volume reste constant, se comporte comme un fluide sous pression : il accepte donc les rotations sans que le matériau ne se déforme de façon notable.

Ces appareils peuvent être équipés d'un système de glissement, généralement constitué d'une plaque en PTFE (*Polytétrafluoroéthylène*) associée à une surface en acier inoxydable, afin d'autoriser également les déplacements de translation. Les appareils d'appui à pot sont souvent choisis pour les ouvrages d'art modernes en raison de leur grande capacité portante, de leur compacité et de leur efficacité lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations complexes.

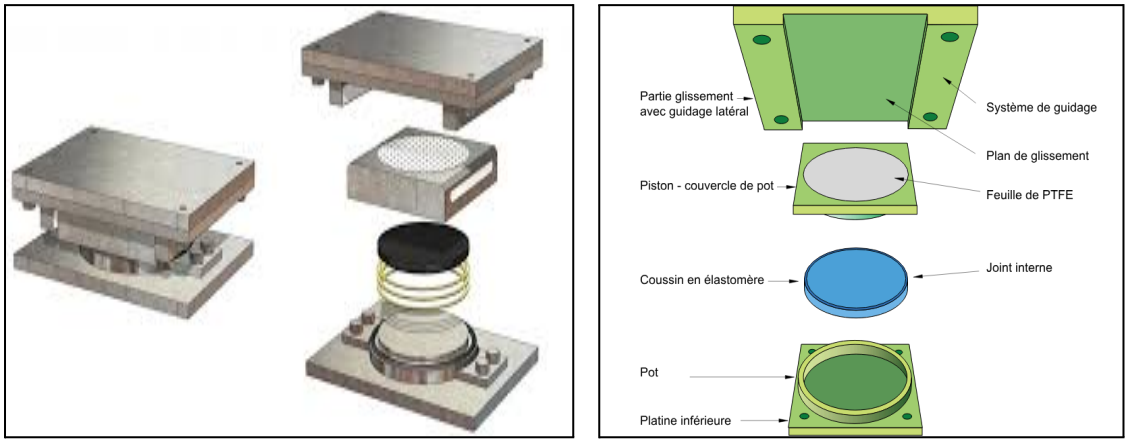


Figure VI.1 : Composition d'un appareil d'appui à pot

VI.4- Le dimensionnement des appareils d'appuis

VI.4.1- Vis à vis des efforts verticaux

Descentes de charges :

A partir du modèle réalisé sur le logiciel MIDAS Civil, les valeurs retenues sont celles des réactions obtenues au chargement de la combinaison " UIC 71 - SW/2" à l'ELU fondamental.

Pour le dimensionnement des appareils d'appuis on prend :

- **Tablier 01 :** R_{max} = 9994.39 kN = 9.994 MN
- **Tablier 02 :** R_{max} = 6774.13 kN = 6.774 MN

Surface du pot S*p* :

Selon le guide *SETRA Appareil d'appuis à pot*, la pression moyenne dans le PTFE sous combinaison fondamentale : $f_{e,d\,moy}$ = 40,00 MPa

On détermine la surface minimale du pot S*p* :

- **Tablier 01** : $Sp = \frac{R_{max}}{f_{e,d\,moy}} = \frac{9.994}{40} = 0.249$ m²

Diamètre minimal du PTFE : $D_{\text{min PTFE}} = \sqrt{\frac{4\,Sp}{\pi}} = 0.56$ m

On retient $D\ PTFE$ = 580 mm (valeur normalisée commerciale)

- **Tablier 02 :** $Sp = \frac{R_{max}}{f_{e,d\,moy}} = \frac{6.774}{40} = 0.169$ m²

Diamètre minimal du PTFE : $D_{\text{min PTFE}} = \sqrt{\frac{4\,Sp}{\pi}} = 0.46$ m

On retient $D\ PTFE$ = 500 mm (valeur normalisée commerciale)

Vérification de la pression effective :

- **Tablier 01 :** $\sigma_P = \frac{9.994}{\pi \times 0.29^2} = 37.82$ MPa < 40 MPa

Taux d'utilisation = $\frac{37.82}{40} = 0.95 = 95\%$ (vérification satisfaite)

- **Tablier 02 :** $\sigma_P = \frac{6.774}{\pi \times 0.25^2} = 34.5$ MPa < 40 MPa

Taux d'utilisation = $\frac{34.5}{40} = 0.86 = 86\%$ (vérification satisfaite)

Surface du coussin *Sc* :

La pression moyenne dans l'élastomère confiné $f_{e,d}$ est limitée à f_U / γ_M sous combinaison fondamentale.

Avec : f_U = 60,00 MPa et γ_M = 1,3 ⇒ $f_{e,d}$ = 46.15 MPa

On détermine la surface minimale du coussin *Sc* :

- **Tablier 01 :** $Sc = \frac{R_{max}}{f_{e,d}} = \frac{9.994}{46.15} = 0.216$ m²

Diamètre minimal du coussin : $Dmin = \sqrt{\frac{4\,Sc}{\pi}} = 0.524$ m

On retient *D* = 550 mm (valeur normalisée commerciale)

- **Tablier 02 :** $Sc = \frac{R_{max}}{f_{e,d}} = \frac{6.774}{46.15} = 0.146$ m²

  Diamètre minimal du coussin : $Dmin = \sqrt{\frac{4\,Sc}{\pi}} = 0.431$ m

  On retient $D = 450$ mm (valeur normalisée commerciale)

Vérification de la pression effective :

- **Tablier 01 :**

  Sc retenue $= \pi \times \left(\frac{0.55}{2}\right)^2 = 0.24$ m²

  $f_{e,d} = \frac{9.994}{0.24} = 41.64 < 46.15$ MPa

  Taux d'utilisation $= \frac{41.64}{46.15} = 0.9 = 90\%$ (vérification satisfaite)

- **Tablier 02 :**

  Sc retenue $= \pi \times \left(\frac{0.45}{2}\right)^2 = 0.15$ m²

  $f_{e,d} = \frac{6.774}{0.15} = 45.16 < 46.15$ MPa

  Taux d'utilisation $= \frac{45.16}{46.15} = 0.97 = 97\%$ (vérification satisfaite)

Epaisseur minimale du coussin :

Une épaisseur classique égale à 1/15 du diamètre permet d'absorber des rotations jusqu'à 0.02 rad

- **Tablier 01 :** t_{min} = D / 15 = 550/15 = 36.66 mm

  On retient t = 40 mm

- **Tablier 02 :** t_{min} = D / 15 = 450/15 = 30 mm

  On retient t = 35 mm.

VI.4.2- Vis à vis des efforts horizontaux

Efforts horizontaux longitudinaux pour les appareils d'appui à pot glissants :

Selon le guide *SETRA Appareil d'appuis à pot* les efforts horizontaux dans les appuis à pot glissant se calcule comme suit :

$H = (\mu_{max} + PP) \times V$

Tel que : V est la charge verticale appliquée à l'appareil d'appui

- Pour le coefficient de frottement d'un appareil d'appui isolé, on a : $\mu_{max} = 3{,}2\ \%$ et la précision de pose de l'appareil $PP = 0{,}3\ \%$

D'où : $H = (\mu_{max} + PP) \times V = 3{,}5\ \% \times V_{max}$

On obtient :

Tablier 01 : H = 0.349 MN

Tablier 02 : H = 0.237 MN

Efforts horizontaux longitudinaux pour les appareils d'appui à pot fixes :

On calcule le coefficient de frottement maximum et minimum u_a , u_r

$u_a = 0{,}5\ u_{max}\ (1 + \alpha)$

$u_r = 0{,}5\ u_{max}\ (1 - \alpha)$

u_a : Coefficient de frottement à retenir dans le cas défavorable.

u_r : Coefficient de frottement à retenir dans le cas favorable.

α : Coefficient de dégressivité dépendant de nombre d'appareils d'appui glissants intervenant dans l'équilibre longitudinal de la structure.

Tableau VI.1 : Coefficient α selon le guide SETRA

n	α
≤ 4	1
4 < n < 10	(16 - n) / 12
≥ 10	0.5

Pour une travée isostatique, n = 2 appareil d'appuis glissant donc α = 1

$u_a = 0{,}5\ u_{max}\ (1 + 1) = u_{max} = 3.2\ \%$

$u_r = 0{,}5\ u_{max}\ (1 - 1) = 0$

VI.5- Dé d'appui

Un dé d'appui est une pièce en béton armé ou précontraint, qui s'appuie sur la tête des piles ou des culées afin de porter directement les appareils d'appui. Son rôle essentiel est de transmettre, de façon uniforme, les efforts verticaux et horizontaux du tablier à l'infrastructure. Afin d'assurer le bon fonctionnement et la durée de vie des appareils d'appui, le dé doit fournir une assise stable, rigide et parfaitement plane, sans subir de déformations significatives sous chargement.

Dimensions du dé d'appuis :

Le dimensionnement des dés d'appui se fait par la détermination des dimensions a_1, b_1 et h_1, selon les recommandations du guide SETRA :

- a_1 = a + 200mm

- b_1 = b + 200mm

- $h_1 \geq 2B_0 / P_0$

Avec : $B_0 = a_1$ x b_1 et $P_0 = 2(a_1 + b_1)$

Tableau VI.2 : Dimensions du dé d'appui

	Culée	Pile
a (mm)	700	750
b (mm)	900	950
H (mm)	400	450
a_1(mm)	900	950
b_1(mm)	1100	1150

h_1(mm)	500	550

Ferraillage du dé d'appui :

Selon le guide du BAEL 91 révisée 99 Annexe E 8,2,3 la section d'acier est calculé comme suit :

Frettage de surface A_s

$A_s = 0{,}04 \frac{R}{fsu}$ avec $f_{su} = \frac{fe}{\gamma s} = 435$ Mpa

Tablier 01 : $A_s = 0{,}04 \frac{9.994}{435} =$ **9.18 cm²**

Tablier 02 : $A_s = 0{,}04 \frac{6.774}{435} =$ **6.22 cm²**

Ferraillage d'éclatement :

$A_{ej} = \frac{R_j}{K_j \times fsu}$ avec $f_{su} = \frac{fe}{\gamma s} = 435$ Mpa

avec :

$K_j = 1$ si **j** repère une position d'extrémité.

$K_j = 1{,}5$ si **j** repère une position intermédiaire.

- **Tablier 01 :**

$R_j = 0.25 \left(1 - \frac{b}{d}\right) R_u = 0.87$ MN

$A_{ej} = 13.33$ cm²

- **Tablier 02 :**

$R_j = 0.25 \left(1 - \frac{b}{d}\right) R_u = 0.59$ MN

$A_{ej} = 9.04$ cm²

$$A_e + A_s = \text{Sup}\left\{max(A_{ej}) + 0,04\,\frac{R}{fsu}\ ;\quad 0.15\,\frac{Max(Rej)}{f_{su}} + 0,04\,\frac{R}{fsu}\right\}$$

- **Tablier 01 :**

$A_e + A_s = \text{Sup}\ \{13.33 + 9.18\ ;\quad 34.46 + 9.18\}$

A_{total} = 43.64 cm² → **9 HA 25**

- **Tablier 02 :**

$A_e + A_s = \text{Sup}\ \{9.04 + 6.22\ ;\quad 23.36 + 6.22\}$

A_{total} = 29.58 cm² → **7 HA 25**

VI.6- Joint sous ballast

Le joint sous ballast est un dispositif installé près des ouvrages d'art qui gère les déplacements entre la voie ferrée et la structure rigide tout en assurant la continuité de la voie.

Fonctions :

- Permettre les mouvements liés à la dilatation thermique et aux tassements.
- Transmettre les efforts entre les rails.
- Maintenir l'alignement et le nivellement de la voie.
- Limiter les contraintes dues aux différences de comportement entre remblai et ouvrage.
- Faciliter la maintenance grâce au démontage partiel des éléments de voie.

VI.7- Calcul du souffle

a) Effet thermique :

$$\Delta \mathbf{L} = \mathbf{L} \times \alpha \times \Delta T$$

ΔL : variation de la longueur
L : longueur dilatable
α : coefficient de dilatation thermique

- Structure en béton : 10.10^{-6}/°C
- Structure métallique ou mixte : 12.10^{-6}/°C

ΔT : différence de température

- **Tablier 01 :**

$$\Delta L_{thermique} = 45 \times 12.\ 10^{-6} \times 40$$
$$\Delta L_{thermique} = 2.16 \text{ cm}$$

- **Tablier 02 :**

$$\Delta L_{thermique} = 30 \times 12.\ 10^{-6} \times 40$$
$$\Delta L_{thermique} = 1.44 \text{ cm}$$

b) Retrait : $\Delta L_{retrait} = \varepsilon_r \times L$

- **Tablier 01 :**

$$\Delta L_{retrait} = 0{,}0005 \times 45$$
$$\Delta L_{retrait} = 2.25 \text{ cm}$$

- **Tablier 02 :**

$$\Delta L_{retrait} = 0{,}0005 \times 30$$
$$\Delta L_{retrait} = 1.5 \text{ cm}$$

c) Fluage : $\Delta L_{fluage} = Kfl \times 10^{-4} \times L$

- **Tablier 01 :**

$$\Delta L_{fluage} = 2 \times 10^{-4} \times 45$$
$$\Delta L_{fluage} = 0.9 \text{ cm}$$

- **Tablier 02 :**

$$\Delta L_{fluage} = 2 \times 10^{-4} \times 30$$
$$\Delta L_{fluage} = 0.6 \text{ cm}$$

d) Rotation d'extrémité sous chargement :

On prend en compte la rotation de notre tablier mixte et la hauteur du tablier sur appuis d'extrémité

- **Tablier 01** : h = 3,5 m.

$$\Delta L_{rotation} = h \times tang\ 0{,}005$$
$$\Delta L_{rotation} = 350 \times 0.005$$
$$\Delta L_{rotation} = 2.015 \text{ cm}$$

- **Tablier 02** : h = 2.5 m

$$\Delta L_{rotation} = h \times tang\ 0{,}003$$
$$\Delta L_{rotation} = 250 \times 0.003$$
$$\Delta L_{rotation} = 0.75 \text{ cm}$$

e) Déplacement sous chargement sismique

- **Tablier 01** : On prend le déplacement de la plus haute pile (catégorie 3) sous combinaison sismique ELA x

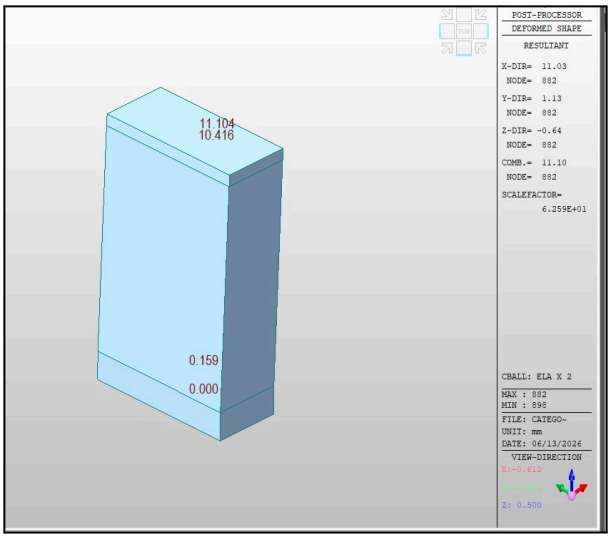


Figure VI.2 : Déplacement de la pile du tablier 01 sous ELA X

$\Delta L_{\text{Sismique}}$ = 11.03 mm

- **Tablier 02 :** On prend le déplacement de la pile (catégorie 2) sous combinaison sismique ELA x

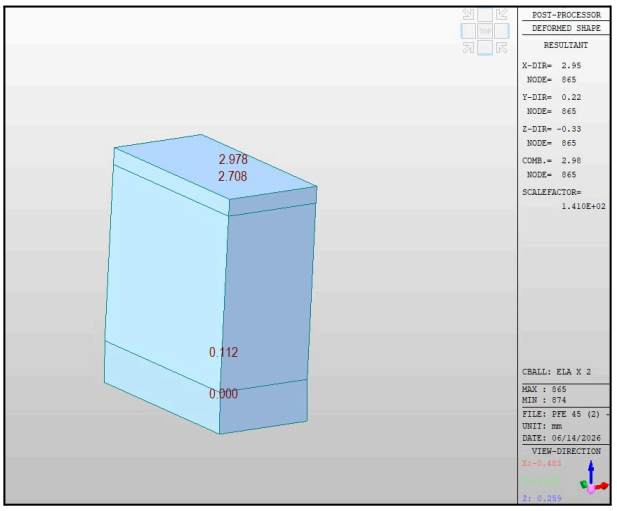


Figure VI.3 : Déplacement de la pile du tablier 02 sous ELA X

$\Delta L_{\text{Sismique}}$ = 2.95 mm

f) Souffle finale :

- **Tablier 01 :**

$$\Delta L_{totale} = \Delta L_{thermique} + \Delta L_{retrait} - \Delta L_{fluage} + \Delta L_{rotation} + \Delta L_{\text{Sismqiue}}$$
$$\Delta L_{totale} = 2.16 + 2.25 - 0.9 + 2.015 + 1.103$$
$$\Delta L_{totale} = 6.628 \text{ cm}$$

- **Tablier 02 :**

$$\Delta L_{totale} = \Delta L_{thermique} + \Delta L_{retrait} - \Delta L_{fluage} + \Delta L_{rotation} + \Delta L_{\text{Sismqiue}}$$
$$\Delta L_{totale} = 1.44 + 1.5 - 0.6 + 0.75 + 0.295$$
$$\Delta L_{totale} = 3.385 \text{ cm}$$

VI.8- Appareil de dilatation ferroviaire

Un appareil de dilatation ferroviaire (ADF) est un dispositif de voie qui permet de gérer la dilatation et la contraction thermique des rails. Il garantit la continuité de roulement des trains sans créer de discontinuité ou de choc sur la surface de roulement.

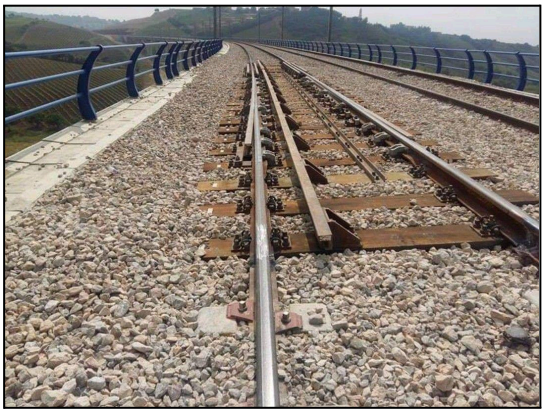


Figure VI.4 : Appareil de dilatation ferroviaire (ADF)

VI.9- Système d'évacuation des eaux pluviales

L'évacuation des eaux pluviales dans un pont est essentielle pour protéger le tablier, éviter la corrosion des armatures, limiter les infiltrations, prévenir les dangers liés au gel ou à la formation de flaques, et assurer la sécurité des usagers.

L'eau de pluie tombant sur le tablier est collectée grâce au dévers transversal et à la pente longitudinale, dirigée vers des dispositifs de drainage, et enfin, évacuée hors de l'ouvrage par des descentes ou gargouilles.

CHAPITRE VII : ÉTUDE DE L'INFRASTRUCTURE

VII.1- Introduction

L'infrastructure d'un pont comprend l'ensemble des éléments interconnectés qui soutiennent l'ensemble de la structure. Elle comporte essentiellement les soubassements et les fondations, et elle est essentielle pour transmettre les charges au sol dans des conditions optimales de sécurité et de stabilité.

Les appuis d'un pont sont constitués des culées et des piles centrales, en béton armé généralement, reposant sur des fondations (souvent des pieux) par l'intermédiaire d'une semelle de liaison. Ils sont soumis à diverses sollicitations, charges permanentes (poids propre, réactions du tablier, poussée des terres) et surcharges (efforts de freinage, pression de l'eau...).

L'étude de l'infrastructure consiste donc à dimensionner ces éléments en fonction des caractéristiques du sol, des charges appliquées et des conditions d'exploitation, de manière à garantir la stabilité et la durabilité de l'ouvrage. Dans le présent chapitre, nous décrirons la conception et l'étude des culées et des piles de notre ouvrage.

VII.2- Définition d'une étude sismique

L'étude sismique consiste à analyser les effets des séismes sur les structures et les sols, dans le but de concevoir des ouvrages capables de résister aux tremblements de terre.

VII.3- Classification de l'ouvrage

D'après le RPOA 2008 on se doit de faire des classifications avant de faire l'étude sismique d'un ouvrage.

Notre ouvrage a pour caractéristiques ce qui suit :

➢ Classe du pont : (RPOA 2.2)

Tableau VII.1 : Classification des ponts

Groupe de pont	Importance
Groupe 1	Pont stratégique
Groupe 2	Pont important
Groupe 3	Pont d'importance moyenne

Notre pont fait partie du **groupe 1**

➢ Zone sismique : (RPOA 3.1.1)

En tenant compte de l'emplacement géographique de l'ouvrage, la zone sismique est **IIa.**

➢ Nature du sol :

D'après les sondages effectués sur le sol, la portance de ce dernier est classée **S4**.

➢ Accélération sismique de référence : (RPOA 3.1.2)

Tableau VII.2 : Coefficient d'accélération de zone A

Groupe de pont	Zone sismique			
	I	IIa	IIb	III
1	0.15	0.25	0.30	0.40
2	0.12	0.20	0.25	0.30
3	0.10	0.15	0.20	0.25

On prend donc un coefficient de **0.2**

➢ Taux d'amortissement : (RPOA 4.2.4)

ξ = 5% pour le béton armé

ξ = 2% pour les aciers

VII.4- Masses (RPOA 4.2.2)

Pour le calcul des masses, on prend les valeurs moyennes des charges permanentes de la structure, et, pour les ponts à fort trafic, on peut ajouter une partie des charges d'exploitation.

En ce qui concerne les charges d'exploitation ferroviaires, on considère une part de 30%

VII.5- Raideurs des éléments (RPOA 4.2.3)

Les raideurs à prendre en compte proviennent des trois parties d'ouvrages suivantes :

- Fondations et sol environnant.
- Appuis.
- Appareils d'appuis.

On suppose que la souplesse des fondations est négligeable pour la justification du tablier et appuis, ces derniers sont considérés fixés au sol.

VII.6- Spectre de réponse

Le spectre de réponse élastique constitue généralement la donnée de base pour le calcul sismique.

VII.6.1- Spectre de réponse horizontale (RPOA 3.2.1.1)

On utilise le spectre montré ci-dessous :

$$\text{Sae}(T,\xi)_{(m/s^2)} = \begin{cases} AgS\left(1+\frac{T}{T_1}(2.5\eta-1)\right) & 0 \le T \le T_1 \\ 2.5\eta Ag\,S & T_1 \le T \le T_2 \\ 2.5\eta AgS\left(\frac{T_2}{T}\right) & T_2 \le T \le 3.0s \\ 2.5\eta AgS\left(\frac{3T_2}{T^2}\right) & T \ge 3.0s \end{cases}$$

Avec :

- g : accélération de la pesanteur (=9,81m/s²)
- T1, T2 : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site donné dans le tableau ci-dessous :

Tableau VII.3 : Valeurs de T_1 et T_2

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

S : coefficient de site

A : accélération de la zone

η : facteur de correction de l'amortissement ($\eta=\sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$)

ξ : taux d'amortissement

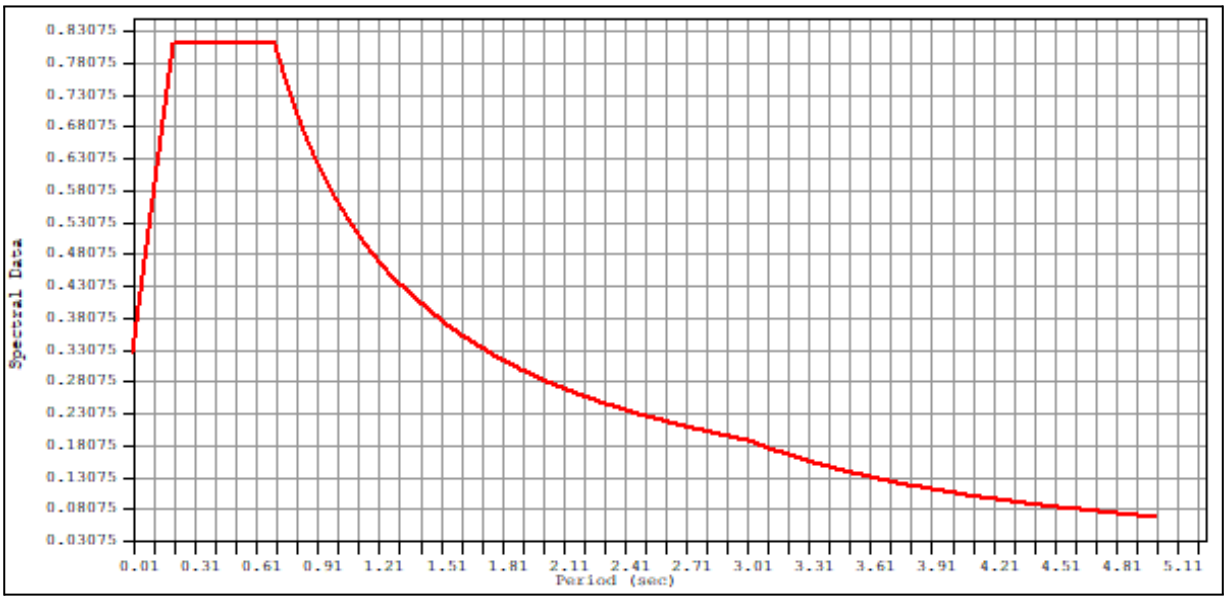


Figure VII.1: Spectre de réponse horizontale

VII.6.2- Spectre de réponse verticale (RPOA 3.2.1.1)

On utilise le spectre montré ci- dessous:

$$Sae^{v}(T)_{(m/s^2)} = \begin{cases} \alpha Ag\left(1+\frac{T}{T_1}(2.5\eta-1)\right) & 0 \le T \le T_1 \\ 2.5\alpha Ag\eta & T_1 \le T \le T_2 \\ 2.5\alpha Ag\eta\left(\frac{T_2}{T}\right) & T_2 \le T \le 3.0s \\ 2.5\alpha Ag\eta\left(\frac{3T_2}{T^2}\right) & T \ge 3.0s \end{cases}$$

Avec:

g : accélération de la pesanteur (=9,81m/s²)

T1, T2 : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site donné dans le tableau ci-dessous:

Tableau VII.4 : Valeurs de T_1 et T_2

Site	S1	S2	S3	S4
T_1	0,15	0,15	0,20	0,20
T_2	0,30	0,40	0,40	0,40

S : coefficient de site égale à 1

α : coefficient qui tient compte de l'importance de la composante verticale en zone de forte sismicité.

α = 0,7 pour les zones sismiques I, IIa et IIb et 1,0 pour la zone sismique III.

A : accélération de la zone

η : facteur de correction de l'amortissement ($\eta=\sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$)

ξ : taux d'amortissement

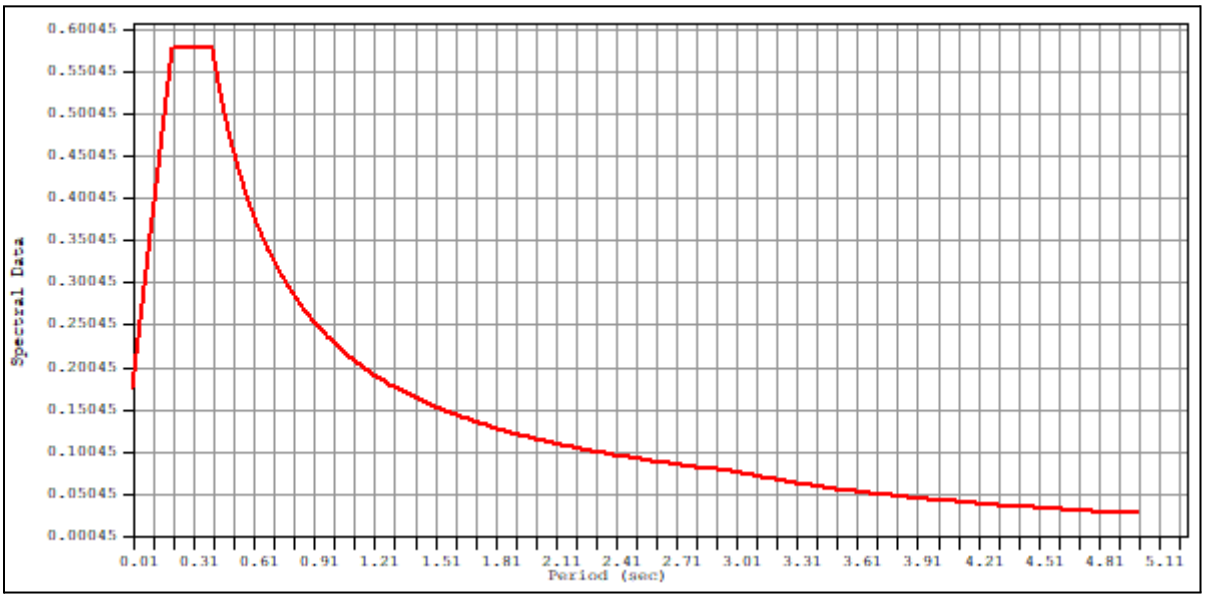


Figure VII.2 : Spectre de réponse verticale

VII.7- Analyse dynamique linéaire — Méthode du spectre de réponse (RPOA 4.3.2)

L'analyse par le spectre de réponse est une méthode dynamique multimodale qui combine les contributions des différents modes de la structure afin d'estimer les effets sismiques maximaux qu'elle subit.

Tous les modes ayant une contribution importante à la réponse de la structure doivent être pris en compte. Le critère est satisfait si la somme des masses modales effectives atteint au moins 90 % de la masse totale du pont. Elle peut aussi être considérée suffisante à 70 % si l'on ajoute un mode résiduel représentant la masse restante non prise en compte.

VII.8- Combinaison des réponses modales (RPOA 4.3.2.4)

Lors d'un séisme, tous les modes propres sont excités en même temps, donc leurs réponses ne peuvent pas être additionnées directement et doivent être combinées par une méthode statistique comme la CQC (combinaison quadratique complète), qui tient compte de leur interaction.

Le logiciel de calcul MIDAS intègre automatiquement cette méthode.

La valeur maximale de l'effet de l'action est donnée par la formule:

$$\sqrt{\sum_i \sum_j EirijEj}$$

avec : i = 1 à n ; j = 1 à n

n : le nombre de modes significatifs considérés

r_{ij} : facteur de corrélation donné par la formule

$$r_{ij} = \frac{8\xi^2(1+\rho)\rho^{3/2}}{10^4(1-\rho^2)^2 + 4\xi^2\rho(1+\rho)^2}$$

$\rho = \frac{Ti}{Tj}$ **:** rapport lorsque deux modes ont des périodes naturelles peu espacées Ti ≤ Tj

VII.9- Combinaison des composantes de l'action sismique (RPOA 4.3.2.5)

L'incertitude sur la direction du séisme est prise en compte en combinant les efforts sismiques dans les différentes directions. L'estimation de l'effet maximal probable E s'effectue à partir des effets Ex, Ey et Ez calculés séparément selon les axes X, Y et Z, en supposant qu'ils agissent simultanément.

Les effets des différentes composantes du mouvement d'ensemble sont combinés de la manière suivante :

$$E = E_x \pm 0.3\ E_y \pm 0.3\ E_z$$

$$E = E_y \pm 0.3\ E_x \pm 0.3\ E_z$$

$$E = E_z \pm 0.3\ E_x \pm 0.3\ E_y$$

Avec : E_x, E_y et E_z sont les effets des actions sismiques dans chacune des directions respectives X, Y et Z.

VII.10- Combinaison des actions de calcul (RPOA 5.1)

Les combinaisons à prendre en compte et les coefficients partiels de sécurité sont propres aux calculs sismiques .

Pour la vérification des structures on utilise :

$$G + P + E + 0{,}4\ \Delta T + D + \Psi Q$$

avec :

G : valeur nominale des charges permanentes.

P : forces de précontrainte éventuelles (à long terme).

E : action sismique limitée au mouvement d'ensemble de la combinaison la plus défavorable.

Q : actions variables des charges d'exploitation.

(Les combinaisons à étudier sont UIC71+UIC71 et UIC71+SW/2)

ΔT désigne les variations de température.

D les déformations différées des matériaux (retrait et fluage du béton).

Ψ : coefficient de combinaison, 0.3 pour les lignes ferroviaires.

Tableau VII.5 : Combinaisons de charge à l'état limite accidentelle

Combinaison à l'ELA	suivant E_x	G + 0.3Q + (Ex ± 0.3Ey ± 0.3Ez) ± 0.4T + D
	suivant E_Y	G + 0.3Q + (0.3Ex ± Ey ± 0.3Ez) ± 0.4T + D
	suivant E_Z	G + 0.3Q + (0.3Ex ± 0.3Ey ± Ez) ± 0.4T + D

VII.11- Étude des piles

VII.11.1- Conception

Les piles sont les appuis qui transmettent les efforts du tablier aux fondations. Leur conception varie selon le type de tablier, les fondations et les contraintes du site (naturelles et fonctionnelles).

Le type de la pile varie en fonction de la hauteur de cette dernière.

Tableau VII.6 : Implantation des piles de l'ouvrage

Pile	Implantation	Hauteur (m)
P 01	PK 3+030	10.4
P 02	PK 3+060	13
P 03	PK 3+105	13
P 04	PK 3+150	13
P 05	PK 3+195	17.2
P 06	PK 3+240	15.8
P 07	PK 3+285	13.9
P 08	PK 3+330	13
P 09	PK 3+375	13
P 10	PK 3+420	7.8

On classifie les piles selon le tableau suivant :

Tableau VII.7 : Classification des types de piles

Hauteur de la pile (m)	Type
$h_p < 9$	Voile
$h_p > 10$	Évidé

En ce qui concerne le dimensionnement on opte pour la conception suivante :

❖ Pour les piles voile **(catégorie 01) :**

- **Le chevêtre :**

Hauteur du chevêtre : l'épaisseur h_c doit vérifier $h_c \leq 1{,}25\ h_t$

Avec: h_t : Hauteur de la poutre

➢ Tablier 01 :

1.25 x 3.5 = 4.375 m, On fixe donc h_c = 2m

➢ Tablier 02

1.25 x 2.5 = 3.125 m, On fixe donc h_c = 2m

Largeur du chevêtre : l = 3 m

Longueur du chevêtre : L = 10.5 m

- **Le voile :**

Longueur : L = 8 m

Largeur : e = 2 m

- **La semelle :** On encre la semelle a environ 0,5 m du terrain naturel.

Épaisseur : e' = 1.2 x e = 2.4 m, on prendra une valeur plus normalisée : 2.5 m

Largeur l = 13.6 m

Longueur L = 16.8 m

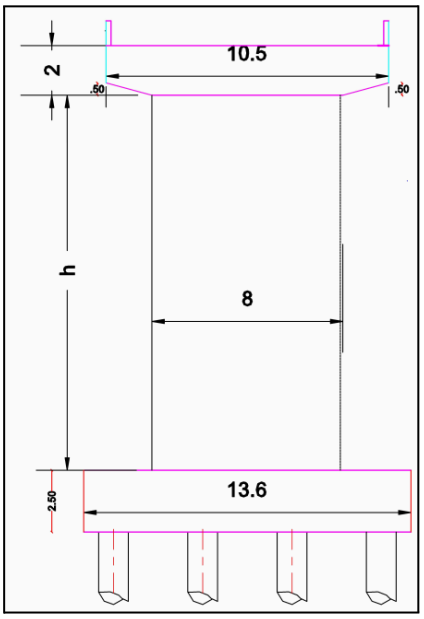


Figure VII.3 : Coupe transversale de la pile type voile

❖ Pour les piles évidées on distingue deux sous-catégories :

- Les piles $10 < h_p < 15.5$ m **(Catégorie 02)**

  Le voile devient :

  Longueur : 8m

  Largeur totale : 3.5m

  Epaisseur des parois : 0.6 m

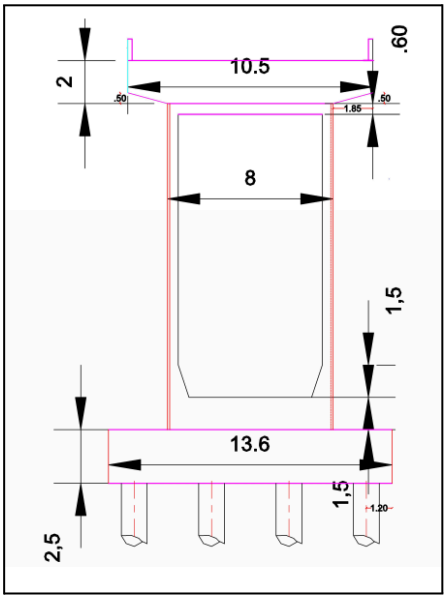


Figure VII.4 : Coupe transversale de la pile type évidé -2-

- Les piles 17 < h_p **(Catégorie 03)**

  Le voile devient :

  Longeur : 8m

  Largeur totale : 4.5m

  Epaisseur des parois : 0.8 m

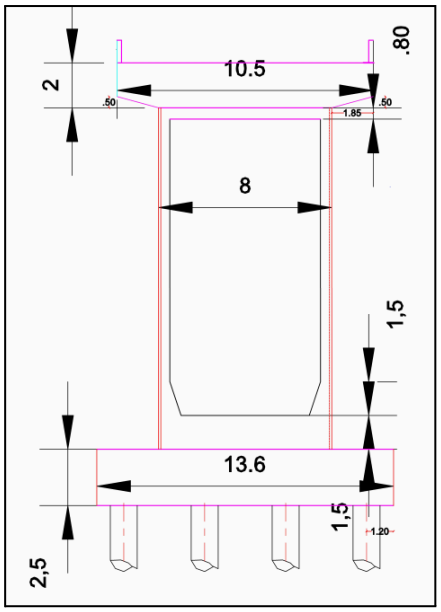


Figure VII.5 : Coupe transversale de la pile type évidé -3-

VII.11.2- Vérification de la stabilité au flambement

Selon les Règles BAEL, il n'y a pas lieu de faire la vérification au flambement lorsque le rapport d'élancement λ de l'élément est inférieur à 70.

$$\lambda = \frac{Lf}{i} \leq 70$$

Avec :

L_f : longueur du flambement de la pile la plus haute ($L_f = 2 \times L_0$.)

i : rayon de giration de la section

- $i_x = \sqrt{\frac{Ix}{B}}$ (*transversale*ment)
- $i_y = \sqrt{\frac{Iy}{B}}$ (Longitudinalement).

B : aire de la section droite

Il y a 10 piles, puisque les sections varient en fonction de la catégorie de la pile on ne vérifie le flambement uniquement pour les piles les plus élancées de chaque catégorie.

On résume les calculs dans le tableau suivant :

Tableau VII.8 : Vérification du flambement mécanique

Catégorie	L_f (m)	i_x	i_y	λ_x	λ_y	Statut
01	15.6	2.30	0.57	6.78	27.36	**vérifié**
02	27.8	1.78	0.88	15.85	31.58	**vérifié**
03	34.4	1.89	1.15	18.19	29.87	**vérifié**

VII.12- Évaluation des sollicitations agissant sur la pile

VII.12.1- Sollicitation sismiques

Les efforts sismiques provoquent des sollicitations à la base de la pile, ces efforts sont les suivants :

- ELA: G + 0.3 (UIC71 + SW/2) + E ± 0.4T + D

Tableau VII.9 : Efforts dus au séisme à la base de la pile

Réaction		Catégorie 01	Catégorie 02	Catégorie 03
R_v (KN)	**ELA X**	6685.72	1911.22	8266.35
	ELA Y	2382.16	5902.95	3010.02
	ELA Z	3446.26	1946.09	4466.93
R_L (KN)	**ELA X**	27422.05	20474.8	25760.47
	ELA Y	28831.67	21903.62	27403.1
	ELA Z	26449.18	20116.18	25110.36
R_T (KN)	**ELA X**	1774.82	6678.32	1977.4
	ELA Y	5391.25	2629.74	5997.91
	ELA Z	1775.35	4450.33	2043.73
M_L (KN.m)	**ELA X**	53204.62	96812.05	104704.42
	ELA Y	19495.63	122912.15	38706.12

	ELA Z	27750.53	41343.27	57222.13
M_T (KN.m)	**ELA X**	23493.88	106828.03	34848.97
	ELA Y	67736.85	42557.89	104357.18
	ELA Z	23500.59	71363.79	35250.49

VII.12.2- Combinaisons de charges

On se doit de vérifier les combinaisons de charges les plus défavorables à notre structure, c'est a dire :

- ELS : G + UIC71 + SW/2 +T + Freinage SW/2 + démarrage UIC71
- ELU : 1.35G + 1.2 SW/2 + 1.45 UIC71 + 0.9 T + 1.2 Freinage SW/2 +1.45 Démarrage UIC71

Tableau VII.10 : Efforts à la base de la pile à L'ELS

Réaction	Catégorie 01	Catégorie 02	Catégorie 03
R_v (KN)	2329.99	2330.0	2330.01
R_L (KN)	36949.5	29805.8	35668.99
R_T (KN)	424.0	2330.0	411.24
M_L (KN.m)	21179.7	36557.1	33295.38

Tableau VII.11: Efforts à la base de la pile à L'ELU

Réaction	Catégorie 01	Catégorie 02	Catégorie 03
R_v (KN)	3045.98	3046.0	3046.02
R_L (KN)	49559.18	39915.1	47830.46
R_T (KN)	545.78	3046.9	527.11
M_L (KN.m)	27690.5	47793.3	43529.28

VII.13- Ferraillage de la pile

Pour la suite de cette étude on retient la pile **P 05** comme étant une pile représentative pour l'étude du ferraillage.

On place généralement l'armature d'une poutre rectangulaire creuse en deux nappes : une première nappe au voisinage de la face extérieure et une seconde nappe au voisinage de la face intérieure.

Pour le calcul et le dimensionnement de ce genre de section, on se sert des abaques de **Walther.**

Dans cette approche, la répartition réelle des armatures est remplacée par une modélisation simplifiée équivalente.

Cette modélisation suppose une armature distribuée linéairement au milieu de l'épaisseur de la paroi en béton, avec une répartition présentant une double symétrie.

L'abaque correspondant à une section rectangulaire creuse dépend donc lui aussi de deux paramètres supplémentaires :$\frac{tx}{b}$ et $\frac{ty}{H}$, épaisseurs relatives des parois.

➢ Section proposée

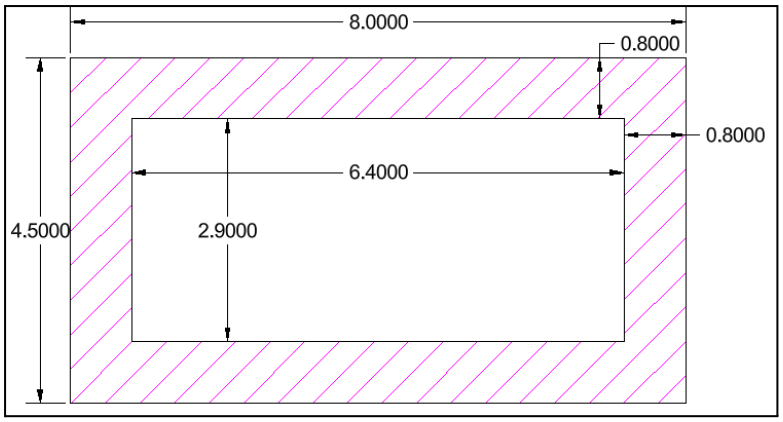


Figure VII.6 : Section transversale de la pile représentative

Avec :

b: grand côté externe de la section

H : petit côté externe de la section

t_x et t_y : épaisseurs des parois dans les sens x et y respectivement.

➢ Orientation de la section

On se doit de vérifier les conditions suivantes:

$$\frac{tx}{b} > \frac{ty}{H}$$

$$\frac{tx}{b} < 0.24$$

Tableau VII.12: Calcul des paramètres d'orientation de la section

Paramètre	b (m)	H (m)	t_x (m)	t_y (m)	$\frac{ty}{H}$	$\frac{tx}{b}$	Condition
Valeur	8	4.5	0.8	0.8	0.17	0.1	**vérifiées**

On remplace la section réelle (b x H) par une section fictive, en général extérieurement carrée, ce qui revient à adopter une représentation adimensionnelle des efforts (n_x,m_x,m_y).

Au cours de cette transformation :

- La section peut rester rectangulaire
- Devenir carrée après normalisation complète.

Cette méthode permet d'obtenir des abaques et des diagrammes d'interaction indépendants des dimensions réelles.

$$\beta = \frac{b}{2\,x\,(b+H)} = \frac{8}{2\,x\,(4.5+8)} = 0.32$$

$$n_x = \frac{N}{b\,x\,H\,x\,fc28} \qquad m_x = \frac{Mx}{b\,x\,H^2\,x\,fc28} \qquad m_y = \frac{My}{b^2\,x\,H\,x\,fc28}$$

Les résultats de calcul sont inscrits dans le tableau suivant:

Tableau VII.13 : Calcul des efforts

Paramètre	ELU	ELA
N (KN)	47830.46	27403.1
M_l (KN.m)	43529.28	104704.42
M_t (KN.m)	0	104357.18
n_x	0.049	0.028
m_x	0.009	0.023
m_y	0	0.013

On obtient le degré mécanique à partir des abaques de walther.

$$\omega = \mu \times \frac{\sigma s}{fc28} = \frac{Fatot}{bxh} \times \frac{\sigma s}{fc28} \Rightarrow F_{atot} = \frac{\omega \times b \times h \times fc28}{\sigma s}$$

$$F_{ab} = \beta \times F_{atot} = 0.32 F_{atot}$$

$$F_{ah} = (0.5 - \beta) \times F_{atot} = 0.18 F_{atot}$$

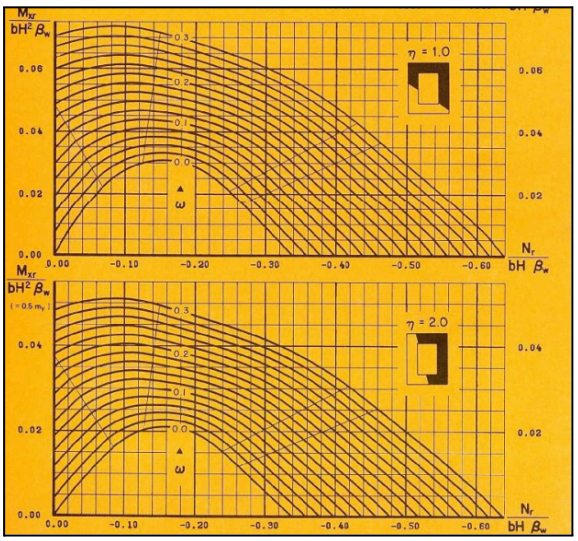


Figure VII.7 : Abaques de Walther

Tableau VII.14: Ferraillage de la pile

	ELU	**ELA**
ω	0	0.3
F_{atot} **(cm²)**	5832	
F_{ab} **(cm²)**	1866.24	
F_{aH} **(cm²)**	1049.76	

- **Condition de non fragilité**

D'après le B.A.E.L on doit vérifier la condition suivante :

$$A_{s,min} = 0.23 \times B \times \frac{ftj}{fe}$$

$$A_{s,min} = 0.23 \times 15.7 \times \frac{2.22}{500} = 0.01603 \text{ m}^2$$

Condition **vérifiée**

- **Choix des barres**

➔ **Côté b :** 1ere nappe 73HA32 et 2eme nappe 73HA25 par côté ⇒ e = 11 cm

➔ **Côté H :** 1ere nappe 41HA32 et 2eme nappe 41HA25 par côté ⇒ e= 11 cm

- **Armatures transversales**

En se fiant au R.P.O.A article 7.2.2.2 "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 :

$$A_t \geqslant \frac{Al\, fel}{16\, fet} \frac{St}{100}$$

Tel que :

S_t: représente l'espacement des armatures transversales en mm ou en m,

A_L: la section totale des armatures longitudinales,

f_{el}, f_{et} : caractéristiques de l'acier des armatures respectivement longitudinales et transversales

L'espacement des armatures transversales est calculé comme suit:

$$St = \min (24\varnothing_t ; 8\varnothing_l ; 0.25d)$$

d : hauteur utile (0.9h)

On choisit des armatures transversales $\varnothing_t$= 14 mm

$$St = 26 \text{ cm}$$

Le ferraillage transversal est représenté comme suit :

Tableau VII.15 : ferraillage de la pile

Paramètre		**Coté H**	**Coté b**
Section des armatures	$\mathbf{A_l}$	1049.76	1866.24
	$\mathbf{A_t}$	170.586	303.264
Ferraillage transversale		HA10/e= 30 cm	HA14/e= 30 cm

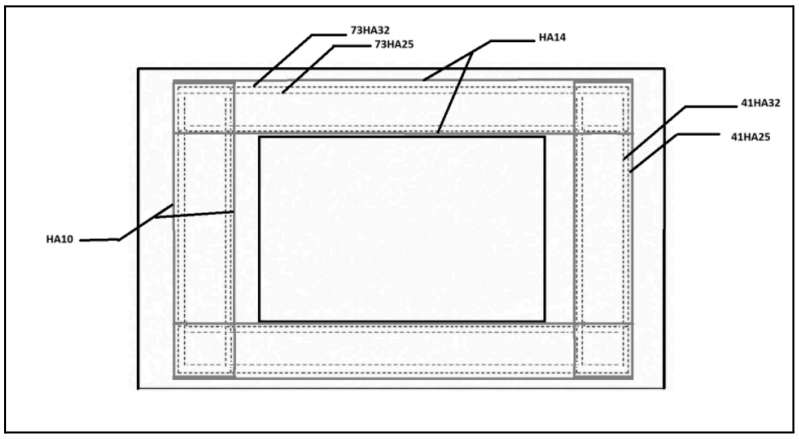


Figure VII.8 : Plan de ferraillage de la pile

- **Ferraillage de la tête de pile**

Au niveau des têtes des piles, les charges verticales transmises par le tablier induisent des concentrations locales de contraintes susceptibles de provoquer la fissuration du béton notamment selon des plans verticaux et obliques aux extrémités du sommier. Pour limiter ces désordres et assurer le bon comportement de l'ouvrage, il est nécessaire de prévoir et de dimensionner des armatures de renfort en accord avec les préconisations du fascicule 73 (PP 73).

- **Armatures de chaînage**

Ces armatures de chaînage sont généralement disposées en une seule nappe et correctement ancrées aux extrémités. Leur section est dimensionnée de manière à reprendre un effort équivalent à 0,25 fois la plus importante descente de charge localisée.

C'est a dire N = 29.805 MN

$$A_c = \frac{0.25\ x\ N}{\sigma s} = 149.025\ cm^2$$

20HA32

- **Armatures horizontales**

Des armatures horizontales sont placées sous le chaînage, sur une hauteur égale à la moitié de l'espacement des appareils d'appui, afin de limiter la propagation des éventuelles fissures. Ces armatures doivent être dimensionnées pour reprendre une force égale à 12,5 % de la même descente de charge.

$$A_h = \frac{0.125\ x\ N}{\sigma s} = 74.12\ cm^2$$

16HA25

- **Armatures verticales**

Les armatures verticales sont placées le plus près possible de la surface supérieure de l'appui. Elles sont constituées par des armatures croisées dimensionnées pour reprendre un effort égal à 4 % de la réaction N.

$$A_v = \frac{0.04\ x\ N}{\sigma s} = 23.8\ cm^2$$

8HA20

VII.14- Étude de la culée

VII.14.1- Conception

Une culée est un mur de soutènement situé à l'extrémité d'un pont, qui sert à porter le tablier du pont et à retenir les terres du remblai.

Tableau VII.16 : Implantation des culées

Culée	Implantation	Hauteur (m)
C 01	PK 3+000	6.15
C 02	PK 3+465	8.11

Pour assurer la stabilité des terrains remblayés, on utilise une culée remblayée qui remplit à la fois les fonctions de soutènement et de structure porteuse. Elle comprend un mur de face et des murs latéraux en béton armé, appelés murs d'aile.

En ce qui concerne le dimensionnement on opte pour la conception suivante:

Tableau VII.17 : Dimensionnement de la culée

Élément	Valeur	
Mur frontal	**Hauteur**	variable
	Longueur (m)	13.6
	Largeur (m)	1.8
Mur en retour	**Épaisseur (m)**	0.8
Mur garde grève	**Hauteur (m)**	3
	Épaisseur (m)	0.4
Semelle	**Hauteur (m)**	2
	Largeur (m)	14

	Longueur (m)	9.6
Pieux	**Entraxe (m)**	3.8
	Diamètre (m)	1.2

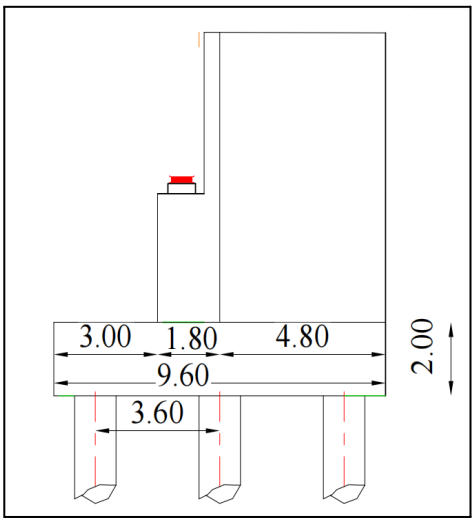


Figure VII.9 : Coupe latérale de la culée

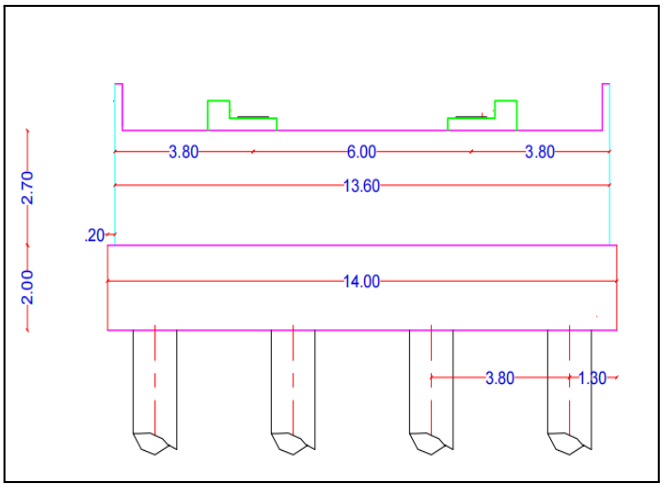


Figure VII.10 : Coupe transversale de la culée

VII.14.2- Efforts de la poussée du sol

Les caractéristiques du remblai sont les suivantes:

- Poids volumique du remblai sur le patin avant : γ = 20.9 KN/m3 ;
- Angle de frottement interne ϕ = 30°.

$k_a = \tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{4}) = \tan^2(45\text{-}15) = 0{,}333$

$k_p = \frac{1}{ka} = 3$

Les efforts d'inertie du mur ou des terres reposant sur la semelle sont calculés à partir des coefficients sismiques K_H et K_v.

$K_H = A = 0{,}20$

$K_V = 0{,}3\ K_H = 0{,}06$

VII.14.3- Vérification de la stabilité de la culée C1 sous charges permanentes

Tableau VII.18 : Descente de charge de la culée

Elément	Effort (t)	Bras de levier$_{/o}$ (m)	Moment$_{/o}$ (t.m)
Mur garde grève	39	5	195
Mur frontal	165.24	5.7	941.86
Mur en retour	134.4	2.4	322.56
Semelle	672	4.8	3225.6
Total W	1010.64	/	4685.02
Poids de la terre	70.224	1.5	105.336

F_a=1/2 . K_a. γ. h^2 (h=7m)
F_p=1/2 . K_P. γ. h^2 (h=0.8m)

Tableau VII.19 : Poussée des terres

Poussée des terres (t)	Poussée F_a	16.89
	Butée F_p	2.0064

- Stabilité au renversement en construction : $\frac{Ms}{Mr} = \infty > 1.5$ (Mr=0)
- Stabilité au renversement avec remblai (La poussée est stabilisatrice et la butée est motrice) $\frac{Ms}{Mr}$>>>1.5

CHAPITRE VIII : ÉTUDE DES FONDATIONS

VIII.1- Introduction

L'étude des fondations est une étape essentielle dans la conception de notre ouvrage d'art, car elles assurent la transmission de l'ensemble des charges de la structure vers le sol et garantissent stabilité et sécurité. Cette étude doit être conduite rigoureusement à l'aide d'une analyse géotechnique approfondie, afin de choisir le type de fondation le mieux adapté et d'en assurer un dimensionnement optimal, tout en tenant compte des contraintes techniques, économiques et environnementales.

VIII.2- Analyse des résultats de l'étude géotechnique

- **Capacité portante du sol**

Le rapport géotechnique établi démontre que le sol est classé en catégorie S4, ce qui représente un sol très faible (forte déformabilité et tassements possibles)

- **Relief vallonné**

Le terrain franchi comporte des pentes douces et vallées modérées

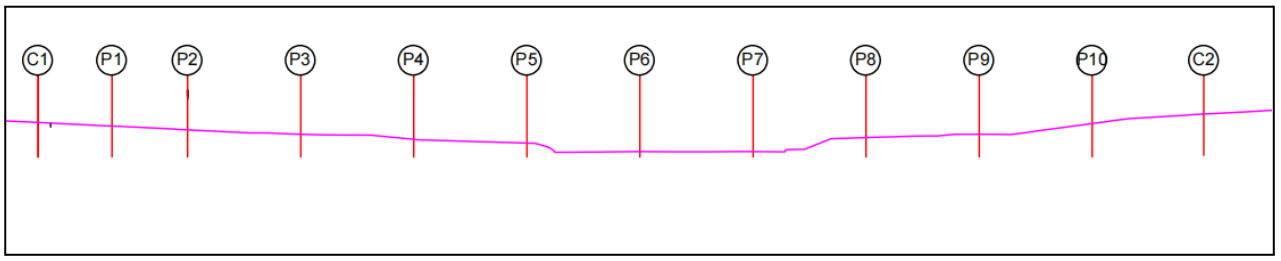


Figure VIII.1 : Coupe longitudinal du terrain

- **Présence d'un cours d'eau**

On remarque la présence d'un oued transversal au tracé de l'ouvrage, ce dernier peut représenter un risque vis-a-vis de la stabilité de notre pont si des mesures ne sont pas prises.

Mesures proposées :

Pour réduire les risques d'érosion dus au passage de l'oued, il est recommandé d'ancrer les semelles des piles concernées (c'est-à- dire la pile P7 et P8) à une profondeur minimale de 3 mètres. Cette mesure vise à renforcer la stabilité des fondations et à garantir la durabilité de l'ouvrage contre les phénomènes d'affouillement et les contraintes hydrauliques.

VIII.3- Types de fondations choisies

On distingue trois grands types de fondations :

1. Fondations superficielles

Utilisées lorsque le sol résistant se trouve à proximité de la surface.

2. Fondations semi-profondes

On les emploie lorsque le bon sol se trouve à une profondeur moyenne.

3. Fondations profondes

Utilisées soit lorsque la couche de sol stable est très profonde, soit lorsqu'il s'agit de charges lourdes.

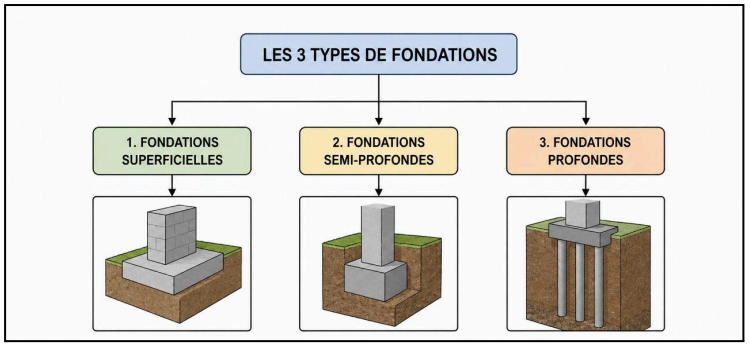


Figure VIII.2 : Les types de fondations

L'ouvrage sera fondé sur des fondations **profondes** de types pieux **forés**, pour résister aux charges de ce dernier.

VIII.4- Étude de fondations profondes sur pieux

VIII.4.1- Pré-dimensionnement des fondations

Nous avons retenu une conception de groupes de pieux de diamètre B = 1,2 m et à hauteurs variables. l'entraxe entre deux pieux est de 3,6 m.

VIII.4.2- Procédure de calcul de la profondeur des pieux

Les pieux transmettent au sol les charges de la structure en faisant appel à la résistance du terrain par deux mécanismes essentiels. D'autre part, la résistance de frottement latérale (Qs), qui se crée le long du corps du pieu par adhérence et par frottement entre le sol et la surface du pieu. Cette composante dépend beaucoup de la nature des sols traversés, de leur compacité et de la rugosité du pieu.

D'autre part, la résistance en pointe (Qp) agit à l'extrémité inférieure du pieu. Elle correspond à la réaction du sol située sous la base du pieu qui s'oppose directement à l'enfoncement de celui-ci. Cette résistance est en général d'autant plus élevée que le sol est plus dense ou rigide.

La capacité portante totale d'un pieu est donc la somme de ces deux contributions, ce qui permet d'assurer la stabilité et la sécurité des fondations profondes.

La formule s'écrit comme suit : $Q_l = Q_p + Q_s$

Tel que :

- la résistance en pointe est donnée par la formule: $Q_p = q_p \times A_p$
- la résistance de frottement latéral est donnée par la formule: $Q_s = q_s \times A_s$

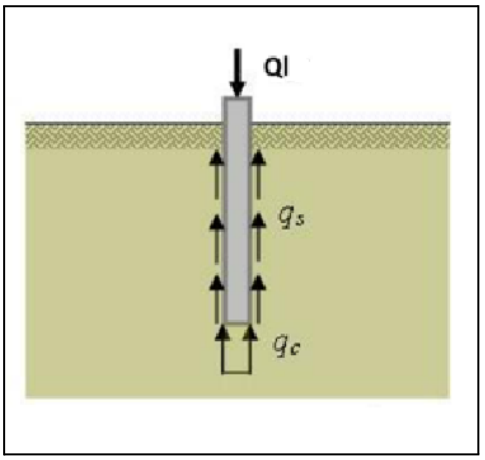


Figure VIII.3 : Schéma représentatif des résistances des pieux

Avec :

A_s : Surface latérale du pieux

A_p : Surface de la pointe du pieu

q_s : Résistance due au frottement du sol sur la surface latérale du pieu.

q_p : Résistance unitaire du sol sous la pointe.

VIII.5- Calcul des résistances (FASCICULE N° 62 - Titre V _ ANNEXE C.3.)

L'étude qui suivra se basera sur le contenu du rapport géotechnique fourni par le bureau d'étude, plus précisément sur les résultats des essais pressiométriques et des sondages carottés.

On précise que la position des essais ne correspond pas exactement à la position des fondations, ce qui nous impose d'utiliser les essais les plus proches de notre fondation.

Tableau VIII.1 : Essais sur chaque fondation

	Sondage pressiométrique	Sondage carotté
C 01	SP 01	SC 03
P 01	SP 02	
P 02	SP 03	
P 03	SP 04	
P 04	SP 05	
P 05	SP 06	
P 06	SP 07	SC 08
P 07	SP 08	
P 08	SP 09	
P 09	SP 10	
P 10	SP 11	
C 02	SP 12	

- Estimation de la résistance en pointe

$$Q_P = A_p \times K_p \times P_{le}^*$$

Avec:

A_p : Section de la pointe.

K_p : Facteur de portance pressiométrique dépendant du type de sol et du mode de mise en œuvre du pieu.

P_{le}^* : Pression limite nette équivalente à la base du pieu

Pour déterminer le facteur de portance on a recours au tableau suivant:

Nature des terrains		Éléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Éléments mis en œuvre avec refoulement du sol
ARGILES - LIMONS	A	1,1	1,4
	B	1,2	1,5
	C	1,3	1,6
SABLES - GRAVES	A	1,0	4,2
	B	1,1	3,7
	C	1,2 (***.*)	3,2
CRAIES	A	1,1	1,6
	B	1,4	2,2
	C	1,8	2,6
MARNES, MARNO-CALCAIRES		1,8	2,6
ROCHES ALTÉRÉES (1) (***.**)		1,1 à 1,8	1,8 à 3,2

(1) La valeur de k_p pour ces formations est prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s´apparente le plus.

Figure VIII.4 : Valeurs de K_p

Pour déterminer P_{le}* on utilise la formule:

$$P_{le}^* = \frac{1}{3a+b} \int_{D-b}^{D+3a} P_l^* \times dz$$

Avec:

$[D + 3a\,;\ D - b]$: La zone utile

P_l* : Pression limite nette

$$a = \begin{cases} \frac{B}{2}, \text{ si } B>1 \\ 0.5, \text{ si } B<1 \end{cases}$$

b = min (a , h)

Avec :

h : l'ancrage de la fondation dans la couche porteuse.

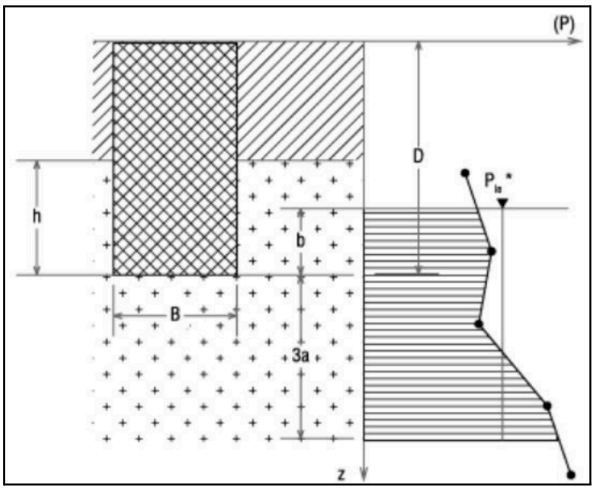


Figure VIII.5 : Paramètres de calcul de P_{le}*

- estimation de la résistance de frottement latéral

$$Q_s = P \times \int_0^h q_s(z) \times dz$$

Avec :

P : périmètre du pieux.

h : la hauteur où s'exerce le frottement latéral.

q_s : le frottement latéral unitaire limité à la cote z lue de l'abaque suivante:

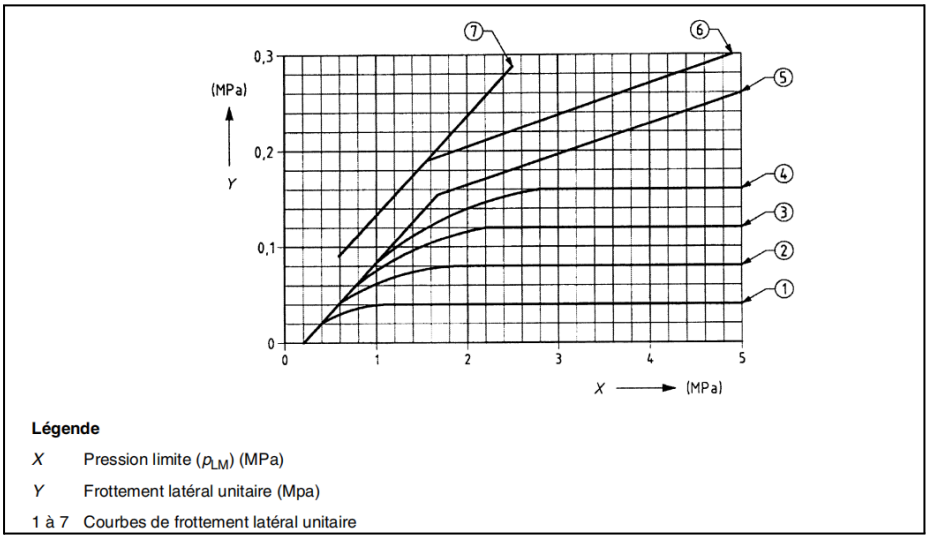


Figure VIII.6 : Courbe de q_s

Le choix de la courbe a suivre dépend du type de sol et de forage, on distingue cette courbe a l'aide du tableau suivant:

	ARGILES LIMONS			SABLES GRAVES			CRAIES			MARNES		ROCHES
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	
Foré simple	Q_1	Q_1, Q_2 (1)	Q_2, Q_3 (1)	-			Q_1	Q_3	Q_4, Q_5 (1)	Q_3	Q_4, Q_5 (1)	Q_6
Foré boue	Q_1	Q_1, Q_2 (1)		Q_1	Q_2, Q_1 (2)	Q_3, Q_2 (2)	Q_1	Q_3	Q_4, Q_5 (1)	Q_3	Q_4, Q_5 (1)	Q_6
Foré tubé (tube récupéré)	Q_1	Q_1, Q_2 (3)		Q_1	Q_2, Q_1 (2)	Q_3, Q_2 (2)	Q_1	Q_2	Q_3, Q_4 (3)	Q_3	Q_4	-
Foré tubé (tube perdu)	Q_1			Q_1		Q_2	(4)			Q_2	Q_3	-
Puits (5)	Q_1	Q_2	Q_3	-			Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
Métal battu fermé	Q_1	Q_2		Q_2		Q_3	(4)			Q_3	Q_4	Q_4
Battu préfabriqué béton	Q_1	Q_2		Q_3			(4)			Q_3	Q_4	Q_4
Battu moulé	Q_1	Q_2		Q_2		Q_3	Q_1	Q_2	Q_3	Q_3	Q_4	-
Battu enrobé	Q_1	Q_2		Q_3		Q_4	(4)			Q_3	Q_4	-
Injecté basse pression	Q_1	Q_2		Q_3			Q_2	Q_3	Q_4	Q_5		-
Injecté haute pression (6)	-	Q_4	Q_5	Q_5		Q_6	-	Q_5	Q_6	Q_6		Q_7 (7)

(1) Réalésage et rainurage en fin de forage.
(2) Pieux de grande longueur (supérieure à 30 m).
(3) Forage à sec, tube non louvoyé.
(4) Dans le cas des craies, le frottement latéral peut être très faible pour certains types de pieux. Il convient d'effectuer une étude spécifique dans chaque cas.
(5) Sans tubage ni virole foncés perdus (parois rugueuses).
(6) Injection sélective et répétitive à faible débit.
(7) Injection sélective et répétitive à faible débit et traitement préalable des massifs fissurés ou fracturés avec obturation des cavités (***.**).

Figure VIII.7 : Choix du type d'abaque pour déterminer q_s

- L'effet de groupe

L'effet de groupe des pieux correspond à l'interaction entre plusieurs pieux rapprochés qui modifie leur capacité portante et les tassements par rapport à des pieux travaillant séparément.

Il se calcule comme suit:

$$Q_{u\ groupe} = N \times C_e \times Q_{u\ pieu}$$

Avec:

$Q_{u\ groupe}$: La résistance ultime du groupe.

N : Le nombre de pieux.

$Q_{u\ pieu}$: Résistance d'un pieu isolé.

C_e : Coefficient d'efficacité calculé par la formule de « Converse Labarre » qui prend en compte de diamètre et l'entraxe des pieux et leurs disposition (nombre de lignes et de

colonnes)

La formule est donnée comme suit:

$$C_e = 1 - \frac{2\,arctan\frac{B}{S}}{\pi} \times \left(2 - \frac{1}{m} - \frac{1}{n} \right)$$

Avec:

B: diamètre du pieu

S: entraxe

m et n : nombre de lignes et de colonnes

Nous avons 3 rangées de 4 pieux dans chaque fondation

$$C_e = 1 - \frac{2\,arctan\frac{1.2}{3.6}}{\pi} \times \left(2 - \frac{1}{4} - \frac{1}{3} \right) = 0.7$$

- Charge de fluage

La charge de fluage (Q_c) est la charge à partir de laquelle l'enfoncement du pieu continue de croître avec le temps, même si la charge reste constante.

Pour les pieux forés sans refoulement du terrain, elle est donnée par :

$$Q_c = \frac{Ql}{1.5}$$

- Calculs et résultats

D'abord il faut déterminer la profondeur des pieux, et cela en évaluant le rapport de la capacité portante des fondations et la descente des charges.

La descente de charge se calcule de la sorte :

$$\text{Ni: } \frac{N}{n} \pm \frac{Ml}{wl} \pm \frac{Mt}{wt}$$

Tel que :

M_t : moment transversal a la base de la semelle (KN.m)

M_l : moment longitudinal a la base de la semelle (KN.m)

N : effort normal a la base de la semelle (KN)

$W_{l/t}$: rapport de distance entre le pieux et l'axe de la semelle longitudinalement et transversalement respectivement.

$$W_l = \frac{\sum nixLxdi^2}{di} \qquad W_t = \frac{\sum nixTxdi^2}{di}$$

On note les sollicitations à la base de la semelle 05 (la pile la plus haute) dans ce tableau:

Tableau VIII.2 : Sollicitations à la base de la semelle

	Descente de charge a l'ELS (t)	**Descente de charge à l'ELU (t)**	**Descente de charge à l'ELA (t)**
Pile 05	624.079	800.77	845.87
	406.979	516.57	20.159

On note la profondeur recommandée à présent ci-dessous:

Tableau VIII.3 : Résistance des groupes de pieux selon la profondeur choisie

	Profondeur recommandée (m)	**Q_c groupe (t)**	**Q_l (t)**
Pile 05	20	705.11	1278.73

La formule à respecter pour vérifier la descente des charges est la suivante:

$$Q_{ELU} = Q_{adm\ ELU} = \frac{Ql}{1.4}$$

$$Q_{ELS} = Q_{adm\ ELS} = \frac{Qc}{1.4}$$

Les résultats sont représentés dans ce tableau:

Tableau VIII.4 : Résistances admissibles aux états limites

	Q_{adm}^{ELU}	Q_{adm}^{ELS}
Pile 05	913.37	503.65

Vérification au poinçonnement et soulèvement

N_{max} = 8458.7 < 42527 KN ⇔ **Pas** de risque de poinçonnement

N_{min} = 20.159 >0 ⇔ **Pas** de risque de soulèvement

VIII.6- Ferraillage des pieux

VIII.6.1- Hypothèses

Pour le ferraillage des pieux, on utilise le logiciel Robot Expert .

Les données nécessaires au ferraillage sont les suivants:

- Contrainte de béton f_{cj}
- Limite élastique d'acier f_e
- Diamètre externe du pieux
- Entre-axe des pieux.
- Moment et effort normal sollicitant

VIII.6.2- Dispositifs de construction (selon B.A.E.L. 91)

- Armatures longitudinales ≥ 0,2 % de la section béton, (A.8.1.21),
- Nombre de barres longitudinales minimale = 6 barres (A8.1.22),
- Espacement des cadres [15×Ølong max ; 40cm ; D+10cm] (A.6.1.25),
- Diamètre minimal des cadres est prise égale à 1/3 du Ø des barres longitudinales (A.6.1.25).

VIII.6.3- Ferraillage

- Longitudinal

D'après les résultats du logiciel Robot Expert on utilise A_s=131.1cm^2 ⇒ 25HA25/e= 14 cm

- Transversal

On choisit des spires de 14mm de diamètre chaque 20cm en zone courante et 15cm en zone critique

VIII.7- Étude de la semelle

On choisit la semelle sous la pile 05

On rappelle les dimensions de la semelle dans la tableau ci-dessous:

Tableau VIII.6 : Dimensions de la semelle

Longueur (m)	Hauteur "h" (m)	Largeur (m)	diamètre des pieux (m)	Entre-axe de pieux "l" (m)	Épaisseur de la pile "b" (m)
16.8	2.5	13.6	1.20	3.4	4.5

- **Ferraillage de la semelle**

Selon le guide SETRA PP 73 on doit d'abord vérifier si on peut utiliser la méthode des bielles, et cela en vérifiant la relation suivante:

$$h > \frac{l}{2} - \frac{b}{4} \ (*)$$

(*) cette relation implique que l'angle d'inclinaison de la bielle avec l'horizon soit supérieure ou égale à 45°

$$\frac{3.4}{2} - \frac{4.5}{4} = 0.575 < 2.5 \Rightarrow \textbf{Condition vérifiée}$$

On peut à présent utiliser la méthode des bielles pour le calcul.

Les calculs qui suivent seront conformes aux normes données par SETRA PP 73

- **Armatures transversales inférieures**

$$A_s = \frac{Nmax}{\sigma a} \times \frac{\frac{l}{2} - \frac{b}{4}}{h}$$

Avec:

N_{max}= 42.527 MN

$\sigma_a = \frac{2}{3} f_e$= 333.3333 MPa

$$\Rightarrow A_s = 293.43 \text{ cm}^2 \Leftrightarrow 60HA25$$

Ces armatures transversales sont disposées en bandes centrées sur les pieux, de largeur égale au diamètre des pieux plus la hauteur (h) de la semelle.

$$L = h + \phi_{pieu} = 2.5 + 1.2 = 3.7 \text{ m}$$

Ce qui nous donne une disposition de 10HA25/ml pour A_s= 79.3 cm^2/ml

Dans ce cas l'espacement sera $S_t = \frac{L}{n-1} \simeq 7$ cm

- **Armatures longitudinales inférieures**

Les armatures longitudinales doivent être placées suivant la longueur de la semelle. La section d'armature par mètre de largeur, ne doit pas être inférieure à un tiers de celle des armatures des poutres transversales, en d'autres termes on prend:

$A_{s1} = \frac{As}{2}$ = 39.65cm^2/ml Ce qui nous donne une disposition de 14HA20

- **Armatures supérieures**

Dans sa partie supérieure, la semelle a des armatures longitudinales filantes sur toute sa longueur. Les armatures supérieures doivent avoir une section au moins égale au dixième de celle des armatures inférieures.

Donc, on garde :

Transversalement : $A_{ti} = \frac{As}{3} = 26.43\ cm^2/ml \Leftrightarrow 6HA25$

Longitudinalement : $A_{li} = \frac{As}{4} = 19.82\ cm^2/ml \Leftrightarrow 10HA16$

- Réseaux d'armatures verticales

$A_l = \frac{As}{10} = 7.93\ cm^2/ml$ Ce qui nous donne une disposition de 4HA16

CHAPITRE IX : ANALYSE DYNAMIQUE

IX.1- Introduction

D'après l'EN 1991-2:2003 article 6.4.1, On peut modifier les contraintes, les déformations et les accélérations du tablier d'un pont sous trafic ferroviaire par :

- La vitesse de circulation et les effets d'inertie (chocs)
- La répétition du passage des essieux pouvant provoquer des phénomènes de résonance
- Les variations de charge dues aux défauts de la voie, du véhicule ou des roues.

Ces effets dynamiques doivent être considérés dans l'évaluation du comportement de l'ouvrage, ce dernier dépend principalement de la vitesse du train, des caractéristiques de l'ouvrage (portée, masse, fréquences propres, amortissement), des charges d'essieux, des irrégularités de la voie, des caractéristiques dynamiques du véhicule et de la voie.

IX.2- Nécessité d'une analyse dynamique

Les critères permettant de déterminer si une analyse est nécessaire sont présentés dans l'organigramme ci-dessous :

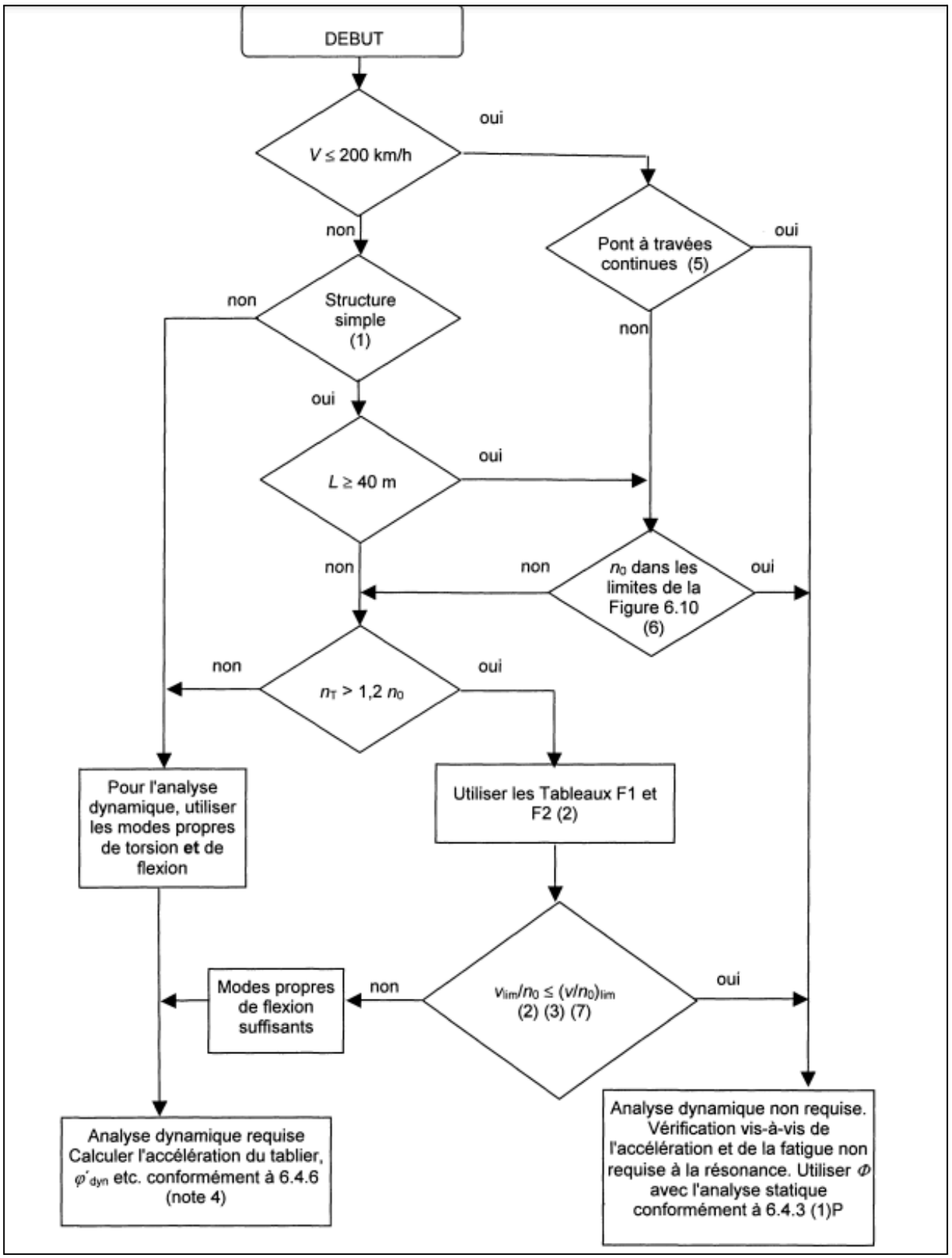


Figure IX.1 : Organigramme permettant de déterminer si une analyse dynamique est nécessaire

Tel que :

- **V** : vitesse maximale de ligne sur le site [km/h]
- **L** : portée de l'élément [m]
- $\mathbf{n}_0$: première fréquence naturelle de flexion du pont chargé par les actions permanentes [Hz]
- **n**□ : première fréquence naturelle de torsion du pont chargé par les actions permanentes [Hz]
- $\nu/\mathbf{n}_{0\ lim}$: rapport de vitesse, valeur donnée.
- ν_u : vitesse nominale maximale [m/s]

(1) Valable pour les ponts sur appuis simples dont le comportement est assimilable à celui d'une poutre droite (sens longitudinal) ou d'une simple plaque, sur appuis fixes, avec effets de biais négligeables.

Les calculs se concentreront sur le tablier 01 pour L=45m

En suivant l'organigramme on obtient :

1. La vitesse maximale de notre ligne atteint les 220 Km/h
2. Notre structure est effectivement simple
3. La portée du tablier 01 L= 45 m est supérieure à 40m.
4. Calcul de n_0, la première fréquence naturelle de flexion du pont

Selon l'EN 1991-2:2003 article 6.4.4 on utilise les limites suivantes :

La limite supérieure de n_0 est liée aux majorations dynamiques dues aux irrégularités de la voie ; elle est donnée par :

$$n_0 = 94{,}76L^{-0{,}748} \quad \text{... (6.1)}$$

La limite inférieure de n_0 est liée à des critères d'impact dynamique ; elle est donnée par :

$$n_0 = 80/L$$

pour 4 m ≤ L ≤ 20 m

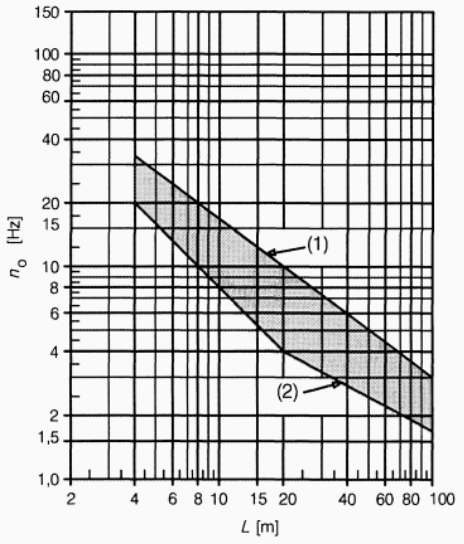
$$n_0 = 23{,}58L^{-0{,}592}$$

pour 20 m < L ≤ 100 m ... (6.2)

où :

n_0 première fréquence propre du pont, tenant compte de la masse, sous actions permanentes ;

L portée dans le cas des ponts sur appuis simples ou L_Φ dans les autres cas.



Légende

(1) Limite supérieure de la fréquence propre

(2) Limite inférieure de la fréquence propre

Figure IX.2 : Limites de la fréquence propre n_0 du pont en fonction de L

Limite supérieure: $n_0 = 94.76 \times L^{-0.748} = 5.58$ Hz

Limite inférieure: $n_0 = 23.58 \times L^{-0.592} = 2.51$ Hz

En se fiant aux résultats obtenus grâce au logiciel MIDAS la première fréquence naturelle de la flexion du pont chargé par les actions permanentes est : $n_0 = 2.9$ Hz

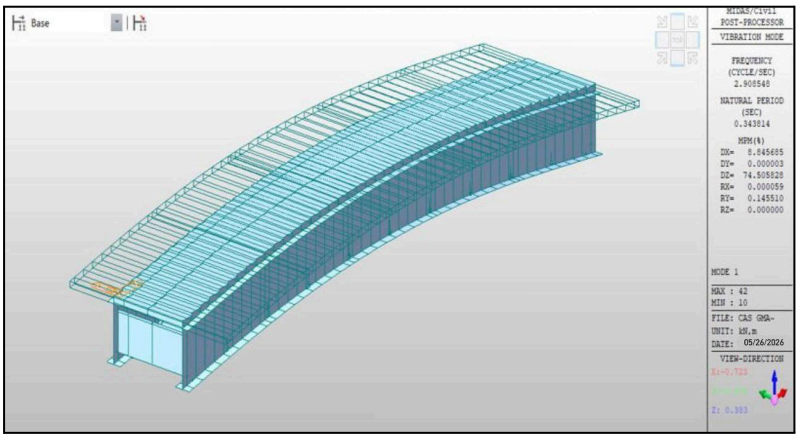


Figure IX.3 : Flexion du tablier au Mode 1

On constate que n_0 est dans les limites de la figure IX.2, donc accordement au diagramme ci dessus l'analyse dynamique n'est pas nécessaire.

Dans ce cas, il est possible d'effectuer une analyse statique équivalente en utilisant un coefficient dynamique ϕ pour les vitesses inférieures à 200 km/h.

Néanmoins, on décide de faire une analyse dynamique compte tenu de la vitesse maximale du convoi qui atteint les 220 Km/h à cause du risque de résonance non négligeable.

Les principales vérifications à effectuer sont:

- Accélération verticale du tablier.
- Rotation aux sections d'about.
- Flèches verticales.
- Coefficient dynamique des convois universels.

IX.3- Charges et combinaisons de charges

D'après l'EN 1991-2:2003 article 6.4.6, "L'analyse dynamique doit être effectuée en utilisant les valeurs caractéristiques des charges des trains réels spécifiées. Le choix des trains réels doit prendre en compte chacune des compositions de train autorisées ou envisagées pour chaque type de train à grande vitesse admis à, ou prévu pour, circuler sur l'ouvrage à des vitesses supérieures à 200 km/h.
L'analyse dynamique doit également être effectuée à l'aide du modèle de charge HSLM sur les ponts conçus pour des lignes internationales lorsque des critères européens d'interopérabilité à grande vitesse sont applicables."

Le modèle de charge HSLM est constitué de deux trains représentatifs avec des longueurs de voiture variables, HSLM-A et HSLM-B.
Notre étude se concentrera sur le modèle HSLM-A.

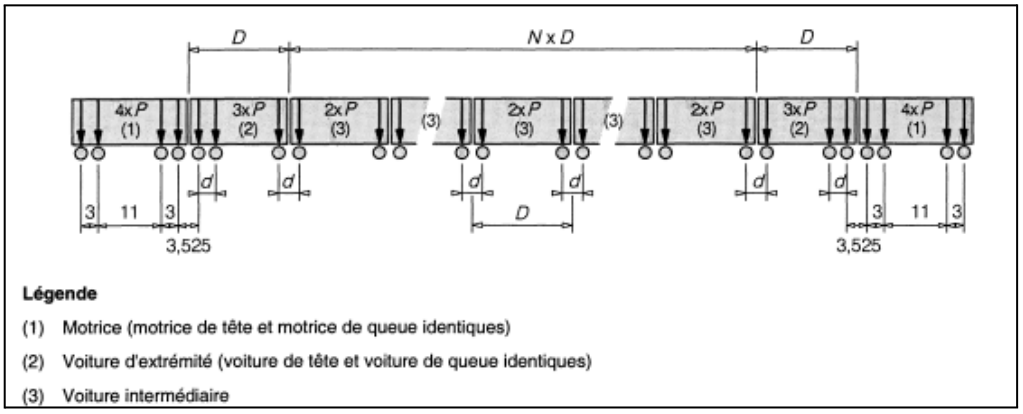


Figure IX-4 : HSLM-A

Train représentatif	Nombre de voitures intermédiaires N	Longueur des voitures D [m]	Distance entre axes des essieux d'un bogie d [m]	Force ponctuelle P [kN]
A1	18	18	2,0	170
A2	17	19	3,5	200
A3	16	20	2,0	180
A4	15	21	3,0	190
A5	14	22	2,0	170
A6	13	23	2,0	180
A7	13	24	2,0	190
A8	12	25	2,5	190
A9	11	26	2,0	210
A10	11	27	2,0	210

Figure IX.5 : HSLM-A

On schématise ces convois en une courbe de la force (KN) en fonction de la distribution spatiale des charges (m) :

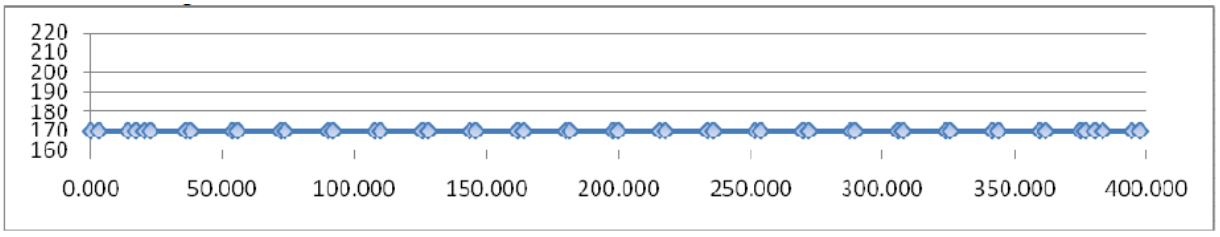


Figure IX.6 : Schéma de charge HSLM-A1

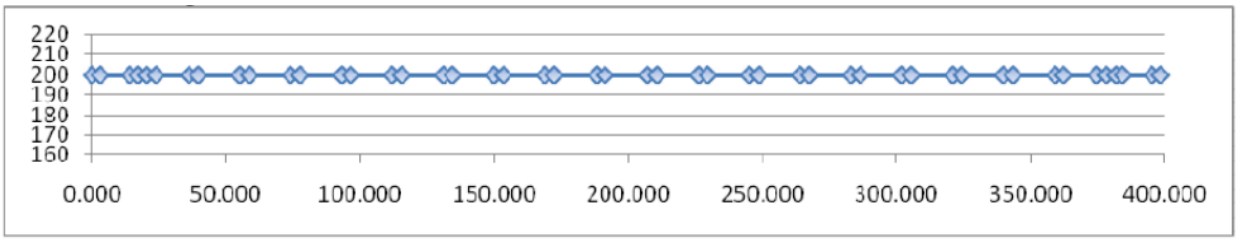


Figure IX.7 : Schéma de charge HSLM-A2

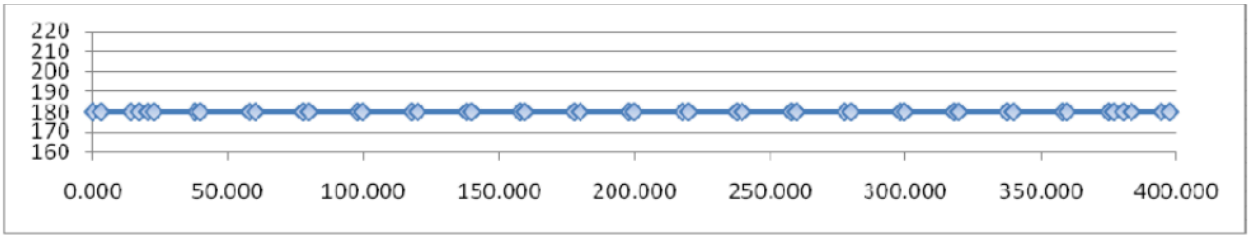


Figure IX.8 : Schéma de charge HSLM-A3

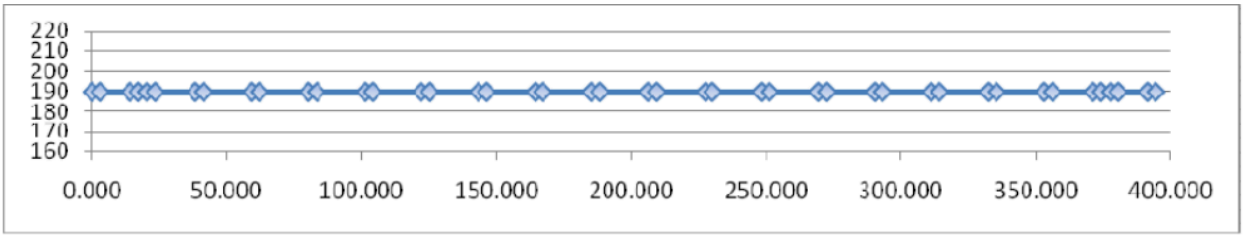


Figure IX.9 : Schéma de charge HSLM-A4

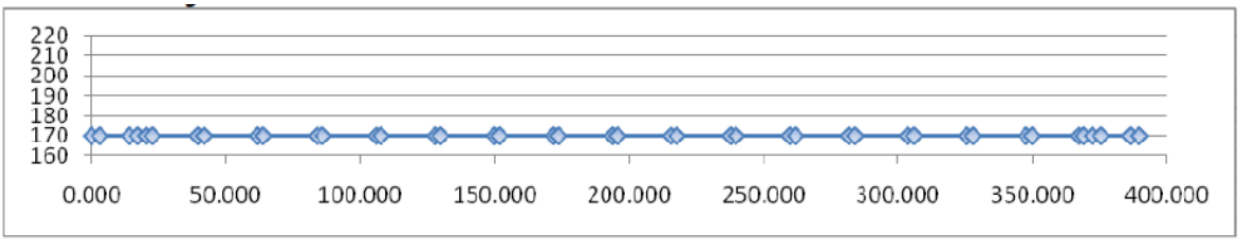


Figure IX.10 : Schéma de charge HSLM-A5

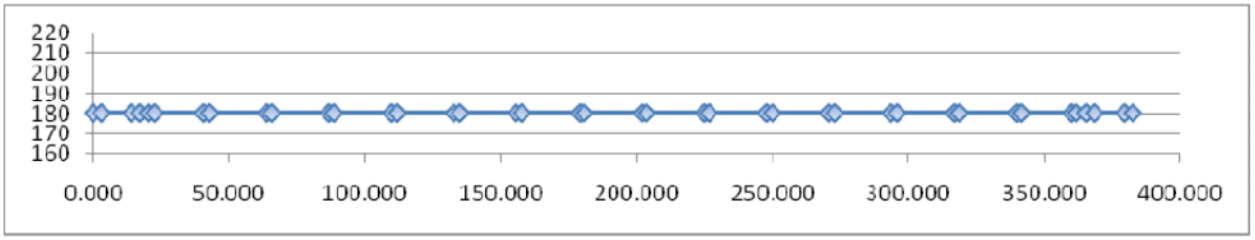


Figure IX.11 : Schéma de charge HSLM-A6

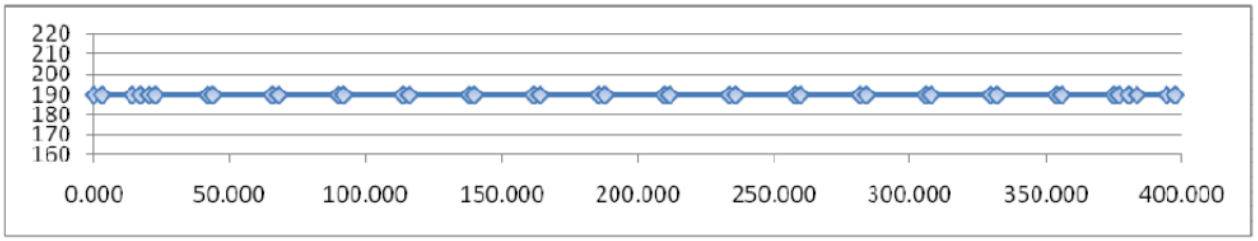


Figure IX.12 : Schéma de charge HSLM-A7

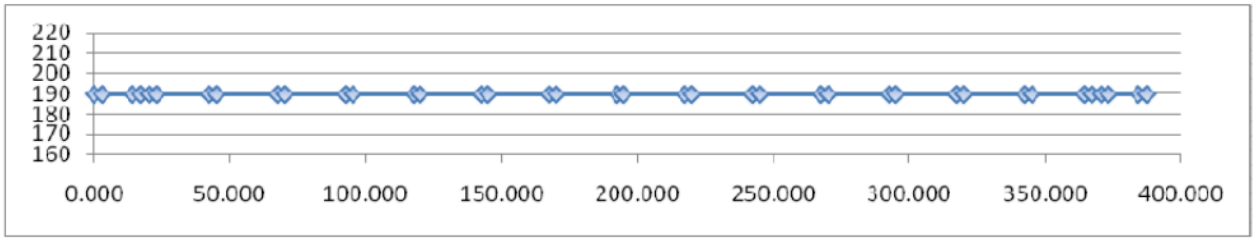


Figure IX.13 : schéma de charge HSLM-A8

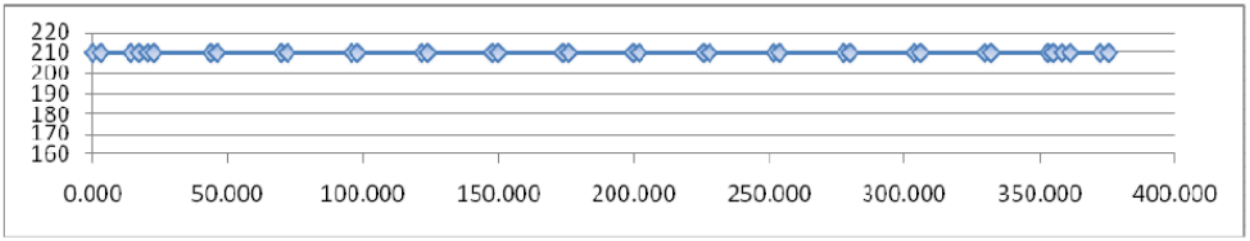


Figure IX.14 : Schéma de charge HSLM-A9

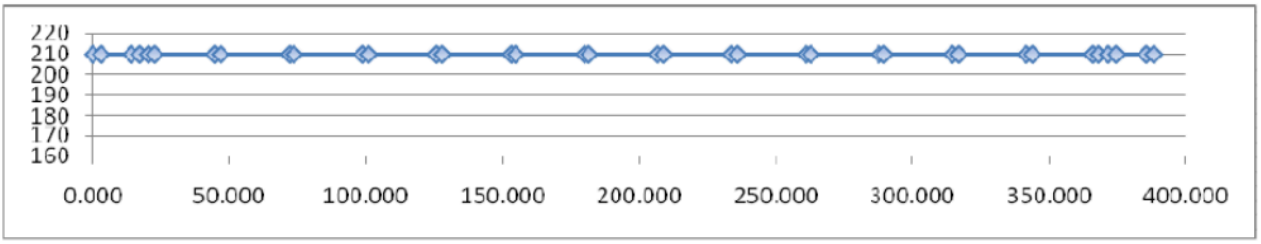


Figure IX.15 : Schéma de charge HSLM-A10

IX.4- Caractéristiques de la section équivalente

IX.4.1- Dimensions du caisson équivalent

En analyse dynamique, on modélise souvent le tablier par un caisson équivalent, car cette représentation reproduit mieux le comportement vibratoire réel, grâce à sa forte rigidité en torsion et à une estimation plus précise des fréquences propres et des effets de résonance.

La section transversale équivalente est donc calculée tel que la section est fermée par les 2 âmes des poutres, la dalle supérieure et les entretoises de contreventement inférieures, on doit toutefois calculer l'épaisseur équivalente de ces dernières.

$$e = \frac{EaId}{GID^3} \frac{0.5Ad}{G}$$

Tel que:

a : Entraxe des poutres

E : Module élastique (210 GPa)

G : Module de cisaillement

A_d : Aire des diagonales du contreventement

I_D :Longueur des diagonales du contreventement

I_d : Distance entre les entretoises

e = 1.6 mm

- Inertie torsionnelle de la section

On utilise la formule de Bredt pour calculer l'inertie de la section équivalente:

$$I_t = \frac{4A^2t}{\int \frac{ds}{e(s)}} = \frac{4A^2t}{\sum_i \frac{si}{ei}}$$

Tel que :

A_t : aire limitée par la ligne moyenne de la section

S_i : Longueur de la ligne moyenne de la paroi "i"

e_i : Épaisseur de la paroi "i"

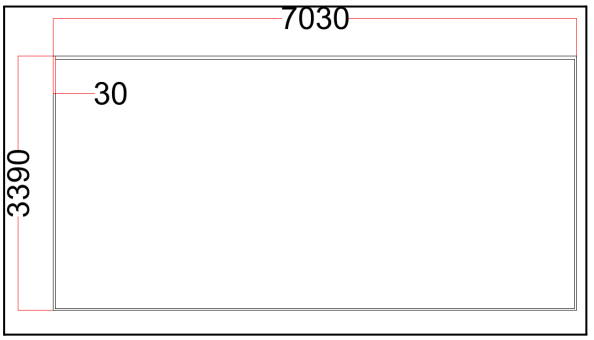


Figure IX.16 : Caisson équivalent

On obtient $I_t = 2.9441\ m^4$

IX.4.2- Caractéristiques du caisson

Comme précédemment calculé, les dimensions de la poutre sont les suivantes:

Tableau IX.1 : Caractéristiques de la poutre réelle

Hauteur (m)	Surface (m^2)	V_s (m)	V_i (m)	I (m^4)
3.5	0.1809	1.59	1.91	0.329

Tableau IX.2 : Caractéristiques du caisson équivalent

Surface horizontale (m^2)	Surface verticale (m^2)	Surface totale (m^2)	I_t (m^4)
0.4218	0.2034	0.6252	2.9441

IX.5- Modes significatifs

En utilisant le logiciel Midas, on obtient les fréquences et périodes propres de chaque mode, On résume les résultats dans le tableau suivant :

Tableau IX.3 : Caractéristiques des différent modes

Mode No	Frequence		Periode
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)
1	19,405624	3,088501	0,323782
2	23,092923	3,675353	0,272083
3	46,177612	7,349395	0,136066
4	64,21239	10,219719	0,09785
5	69,249997	11,021479	0,090732
6	96,938083	15,428175	0,064816
7	115,320795	18,353875	0,054484
8	116,883055	18,602516	0,053756
9	146,357387	23,293502	0,04293
10	161,247918	25,663403	0,038966
11	170,447906	27,127627	0,036863

On obtient aussi la participation massique modale de chaque mode propre (rotationnelle - torsion autour de l'axe du viaduc - et transrationnelle - flexion sur le plan vertical-)

Tableau IX.4 : Participation massique modale

Mode No	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z		ROTN-X		ROTN-Y		ROTN-Z	
	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	82.87	82.87	0.00	0.00	0.13	0.13	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	82.87	81.96	81.96	0.00	0.13	0.00	0.00
3	0.00	0.00	82.87	82.87	0.00	82.87	0.00	81.96	0.00	0.13	0.13	0.13
4	0.00	0.00	0.00	82.87	0.00	82.87	0.00	81.96	64.84	64.98	0.00	0.13
5	0.00	0.00	0.00	82.87	0.00	82.87	9.09	91.05	0.00	64.98	0.00	0.13
6	81.96	81.96	0.00	82.87	0.00	82.87	0.00	91.05	0.00	64.98	0.00	0.13
7	0.00	81.96	0.00	82.87	0.00	82.87	3.26	94.31	0.00	64.98	0.00	0.13
8	0.00	81.96	0.00	82.87	9.15	92.02	0.00	94.31	0.01	64.99	0.00	0.13
9	0.00	81.96	0.00	82.87	0.00	92.02	0.00	94.31	0.00	64.99	64.84	64.98
10	0.00	81.96	0.00	82.87	0.00	92.02	1.66	95.97	0.00	64.99	0.00	64.98
11	**0.00**	**81.96**	**0.00**	**82.87**	**0.00**	**92.02**	**0.00**	**95.97**	**16.05**	**81.04**	**0.00**	**64.98**

IX.6- Vérifications

IX.6.1- Vitesse critique

Cette étape consiste à vérifier que la vitesse de circulation des trains ne provoque pas de résonance avec les fréquences propres du pont, de façon à limiter les amplifications dynamiques de la structure.

Le calcul doit balayer un intervalle de vitesses allant de 140 Km/h a la vitesse potentielle de la ligne, c'est à dire 1.2x 220=264 Km/h (EN 1991-2:2003 article 6.4.6.2) avec un pas de 20Km/h.

Le pic de réponse d'un ouvrage à des vitesses de circulation correspondant au chargement de résonance dépend fortement de l'amortissement.

Tableau IX.5 : Valeurs d'amortissement à prendre en compte pour le calcul

Type de pont	ζ Limite inférieure du coefficient d'amortissement critique [%]	
	Portée $L < 20$m	Portée $L \geq 20$m
Métallique et mixte	$\zeta = 0{,}5 + 0{,}125\ (20 - L)$	$\zeta = 0{,}5$
Béton précontraint	$\zeta = 1{,}0 + 0{,}07\ (20 - L)$	$\zeta = 1{,}0$
Poutrelles enrobées et béton armé	$\zeta = 1{,}5 + 0{,}07\ (20 - L)$	$\zeta = 1{,}5$

On prend donc 0.5%

Le chargement varie selon le convoi, on utilise le logiciel Midas pour modéliser les charges comme démontré par exemple sur la figure suivante :

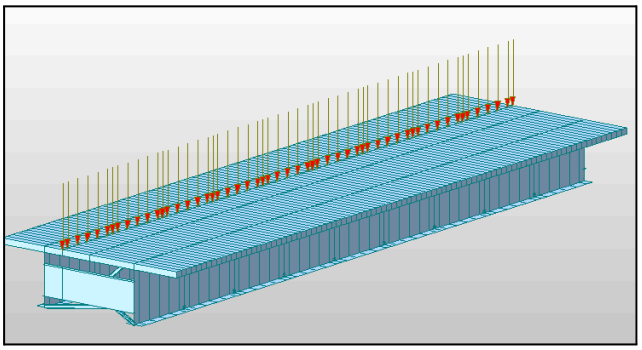


Figure IX.17 : Chargement d'un convoi sur une voie

Afin de calculer les vitesses de chaque convoi on utilise la formule suivante (EN 1991-2:2003 article 6.4.6.2):

$$v_i = n_0 x \lambda$$

Tel que :

v_i : vitesse de résonance (m/s)

n_o : première fréquence propre de l'ouvrage non chargé

λ : longueur d'onde fondamentale, le rapport entre l'espacement régulier entre groupe d'essieux D et i (*) (1 , 2 , 3 ou 4)

On résume les calculs des vitesses de chaque convoi dans le tableau ci-dessous:

Tableau IX.6 : Vitesse critique de chaque convoi

Convoi	Espacement régulier entre groupe d'essieux D (m)	i	Fréquence (Hz)	Vitesse (Km/h)
A1	18	1	3.088	200.1
	18	1	3.675	238.14
	18	2	7.349	238.11
	18	3	7.349	158.7
A2	19	1	3.088	211.22
	19	1	3.675	251.37
	19	2	7.349	251.34
	19	3	7.349	167.56
A3	20	1	3.088	222.34
	20	3	7.349	176.38
A4	21	1	3.088	233.45
	21	3	7.349	185.19

A5	22	1	3.088	244.57
	22	2	3.675	145.53
	22	3	7.349	194.01
	22	4	7.349	145.51
A6	23	1	3.088	255.69
	23	2	3.675	152.15
	23	3	7.349	202.83
	23	4	7.349	152.12
A7	24	2	3.675	158.76
	24	3	7.349	211.65
	24	4	7.349	158.74
A8	25	2	3.675	165.38
	25	3	7.349	220.47
	25	4	7.349	165.35
A9	26	2	3.088	144.52
	26	2	3.675	171.99
	26	3	7.349	229.29
	26	4	7.349	171.97
A10	27	2	3.088	151.08
	27	2	3.675	178.6
	27	3	7.349	238.11
	27	4	7.349	178.58

Les vitesses sont comprises entre les bornes 140 et 264 Km/h → vérifié

IX.6.2- Accélération du tablier

Cette vérification permet de s'assurer que les accélérations verticales du tablier sous le passage des trains restent inférieures aux limites réglementaires, pour garantir la stabilité du ballast et le confort de circulation.

Chaque vitesse de chaque convoi représente une accélération maximale différente.

A titre d'exemple on montre le graphique du convoi A7 pour V=264 km/h

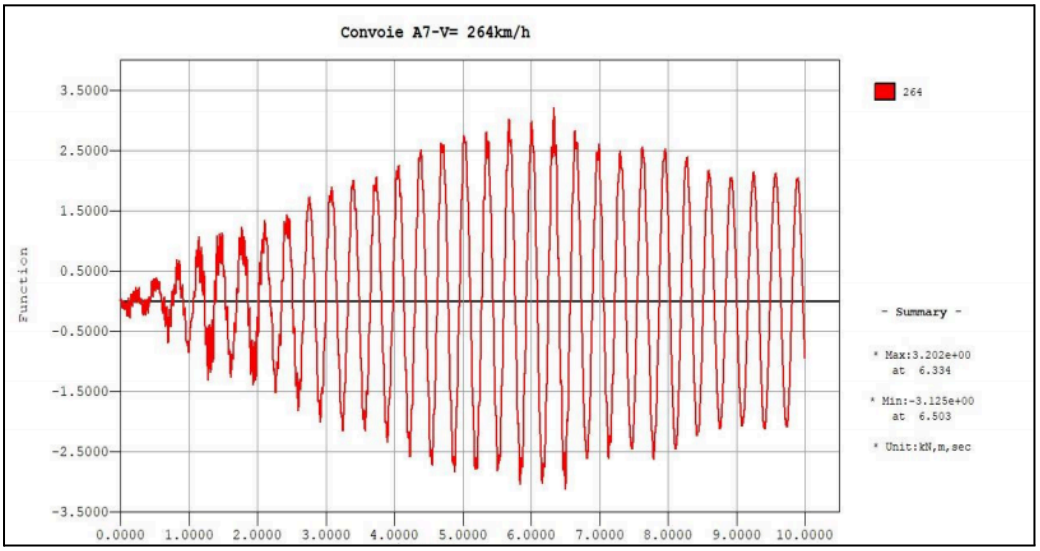


Figure IX.18 : Accélération en fonction du temps

En déterminant toutes les accélérations maximales de cette manière pour les différentes vitesses de chaque convoi on obtient les courbes d'accélération en fonction de la vitesse pour chaque convoi (ANNEXE E) .

On vérifie alors l'accélération maximale pour chaque vitesse et chaque vitesse critique dans les tableaux suivants:

Tableau IX.7 : Vérification de l'accélération maximale pour chaque vitesse

Vitesse (Km/h)	Convoi	Accélération maximale (m/s^2)	Accélération admissible(m/s^2)	Statut
140	**A4**	1.016	**3.5**	**vérifié**
160	**A7**	1.369		**vérifié**
180	**A10**	1.479		**vérifié**
200	**A1**	0.941		**vérifié**
220	**A3**	2.173		**vérifié**
240	**A5**	3.032		**vérifié**
264	**A7**	3.202		**vérifié**

Tableau IX.8 : Vérification de l'accélération maximale pour chaque vitesse critique

Vitesse (Km/h)	convoi	Accélération maximale (m/s^2)	Accélération admissible (m/s^2)	Statut
144.52	A9	0.677	**3.5**	**vérifié**
145.53	A5	1.401		**vérifié**
152.15	A6	1.523		**vérifié**
158.74	A1	0.503		**vérifié**
158.76	A7	0.787		**vérifié**
165.38	A8	1.447		**vérifié**
167.56	A2	0.619		**vérifié**
171.99	A9	1.76		**vérifié**
176.38	A3	0.835		**vérifié**
178.6	A10	1.662		**vérifié**
185.19	A4	0.526		**vérifié**
194.01	A5	0.67		**vérifié**
201.1	A1	0.815		**vérifié**
202.83	A6	0.378		**vérifié**
211.2	A2	1.975		**vérifié**
211.65	A7	0.636		**vérifié**
220.47	A8	0.916		**vérifié**
222.3	A3	2.794		**vérifié**
229.29	A9	0.834		**vérifié**
233.5	A4	3.291		**vérifié**
238.11	A10	0.842		**vérifié**
244.6	A5	2.965		**vérifié**
251.4	A2	2.876		**vérifié**
255.7	A6	3.141		**vérifié**

IX.6.3- Flèche verticale

La flèche verticale correspond au déplacement maximal du tablier sous l'action des charges, lors du passage des trains. Elle permet d'évaluer la rigidité de la structure et doit rester dans les limites admissibles afin de garantir la sécurité et le bon comportement en service.

La flèche admissible varie en fonction de la longueur de la travée, la vitesse des trains et le niveau de confort recherché.

On utilise l'abaque suivante pour déterminer la flèche maximale (EN 1990 A2.3)

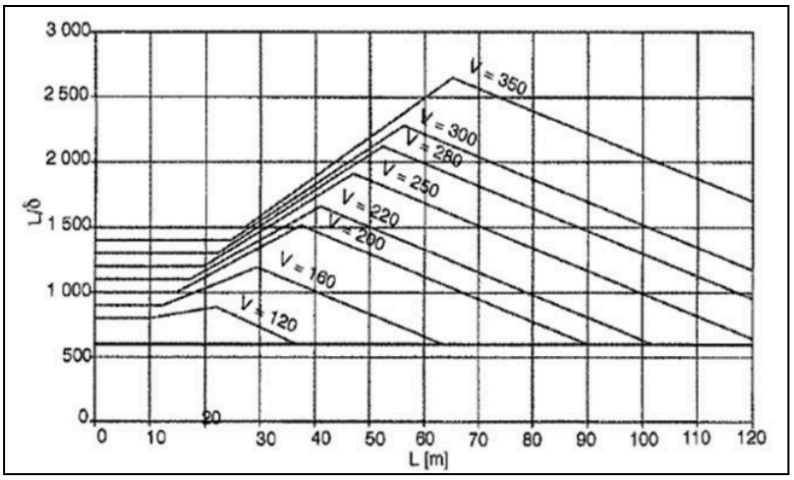


Figure IX.19 : Flèche admissible

Avec :

L: la portée (m)

δ : Flèche verticale maximale (m)

On résume a présent les flèches verticales à mi-travée de chaque convoi dans le tableau suivant :

Tableau IX.9 : Flèches verticales

Convoi	Flèches verticales (mm)						
	140	**160**	**180**	**200**	**220**	**240**	**264**
A1	3.377	3.478	3.617	4.328	3.744	5.653	3.798
A2	3.377	3.958	4.105	4.216	4.82	4.65	4.363
A3	3.466	3.534	3.674	3.889	**9.274**	4.823	5.711
A4	3.711	3.762	3.817	4.013	4.643	8.268	4.182
A5	3.273	3.424	3.62	3.618	3.744	**9.671**	4.231
A6	3.466	3.478	3.87	3.929	4.504	5.127	7.882

A7	3.658	**5.271**	4.112	4.118	3.744	4.84	**10.828**
A8	3.66	4.253	4.285	4.018	4.15	4.779	5.66
A9	**4.155**	4.879	4.612	4.593	4.825	5.653	5.437
A10	4.043	5.01	**6.132**	**4.625**	4.558	5.106	4.696

On décide de vérifier uniquement la flèche maximale, c'est-à-dire celle du convoi A7 pour la vitesse 264 Km/h.

D'après la figure IX.19 la flèche admissible à ne pas dépasser dans ce cas est 20.95 mm

10.828 < 20.95 mm ⇒ la flèche est **vérifiée**

IX.6.4- Coefficient dynamique

Afin de comparer les résultats de l'analyse statique a celle dynamique nous devons calculer des coefficient de majoration.

D'apres l'article 6.4.6.5 de l'EN 1991-2:2003, il convient dans un premier lieu de déterminer la majoration dynamique φ'

$$\varphi' = \max\left(\frac{\delta dyn}{\delta stat} - 1\right)$$

Avec:

δ_{dyn} : flèche verticale dynamique sous convois A1-10 (a partir de MIDAS)
δ_{stat} : flèche verticale maximale sous chargement HSLM (a partir de MIDAS)

On note les résultats du coefficient de majoration dynamique de chaque convoi dans le tableau suivant :

Tableau IX.10 : Coefficient de majoration dynamique φ'

	Coefficient de majoration dynamique φ'									
	A1	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	**A7**	**A8**	**A9**	**A10**
140	0.169	0.03	0.175	0.205	0.177	0.175	0.176	0.181	0.509	0.175
160	0.203	0.207	0.198	0.221	0.232	0.179	0.695	0.372	0.772	0.457
180	0.252	0.252	0.245	0.239	0.302	0.312	0.322	0.383	0.675	0.783
200	0.498	0.285	0.318	0.303	0.301	0.332	0.324	0.297	0.668	0.334
220	0.296	0.47	2.144	0.507	0.347	0.527	0.204	0.339	0.753	0.325
240	0.956	0.418	0.635	1.684	2.479	0.738	0.556	0.542	1.053	0.484
264	0.314	0.33	0.936	0.358	0.522	1.672	**2.482**	0.828	0.975	0.365

$\varphi' = 2.482$

On doit à présent majorer les charges HSLM par un coefficient donnée : $1 + \varphi'_{dyn} + \varphi''$

Tel que :

$$\varphi'' = \frac{a}{100} \text{ x } (56\, e^{\frac{-L\phi^2}{10}} + 50\, (\frac{L\phi\, n0}{80} - 1) e^{\frac{-L\phi^2}{20}})$$

a : 1.0 pour une vitesse maximale > 80 Km/h

$\varphi'' = 2.76 \text{ x } 10^{-3}$

➢ Interprétation des résultats

Pour juger de l'intérêt de l'approche statique équivalente appliquée aux ponts ferroviaires à grande vitesse, on compare les effets obtenus par analyse dynamique sous les modèles de charges HSLM à ceux obtenus par le chargement statique SW/2 majoré par un coefficient dynamique précédemment calculé ϕ_3=1.065).

L'objectif de cette étude est de vérifier que les sollicitations retenues pour le dimensionnement couvrent correctement les effets réels induits par le passage des trains à grande vitesse. ELS

- Analyse statique équivalente

On utilise le momet M_y comme sollicitation de comparaison principale

On obtient: $M_{y,eq} = \phi_3\, M_{ed} = 1.065 \text{ x } 83439.22 = 88862.76$

- Analyse dynamique

On a besoin uniquement du moment maximale de chaque vitesse, on résume les résultats trouvés dans le tableau ci-dessou:

Tableau IX.11 : Moments max correspondant aux différentes vitesses

Vitesse (Km/h)	140	160	180	200	220	240	264
Moment obtenu (KN.m)	14308.6	16797.4	16892.1	16892.1	25540.1	26674.9	29830.3

En conclusion, les effets des charges statiques sont plus importantes que les charges dynamiques, alors la justification du pont se fera sous les charges statiques amplifiées par le coefficient ϕ_3.

IX.6.5- Rotations aux sections d'about (sur appuis)

La vérification de la rotation au niveau des appuis consiste à contrôler les rotations du tablier sous l'effet du passage des trains. Cette vérification permet de garantir un fonctionnement optimal des appareils d'appui et de préserver le confort.

La rotation admissible est calculée par le rapport du déplacement longitudinal maximum entre l'extrémité d'un tablier et sa culée adjacente, ou bien deux tabliers consécutifs (5mm d'après l'article 6.5.4.5.2 de la norme EN 1991-2) et la hauteur de la poutre (3.5m)
La valeur de la rotation admissible est
Le logiciel Midas nous permet d'obtenir les rotations de chaque vitesse, on choisit de garder les rotations maximales, ces dernières sont résumées dans le graphique suivant:

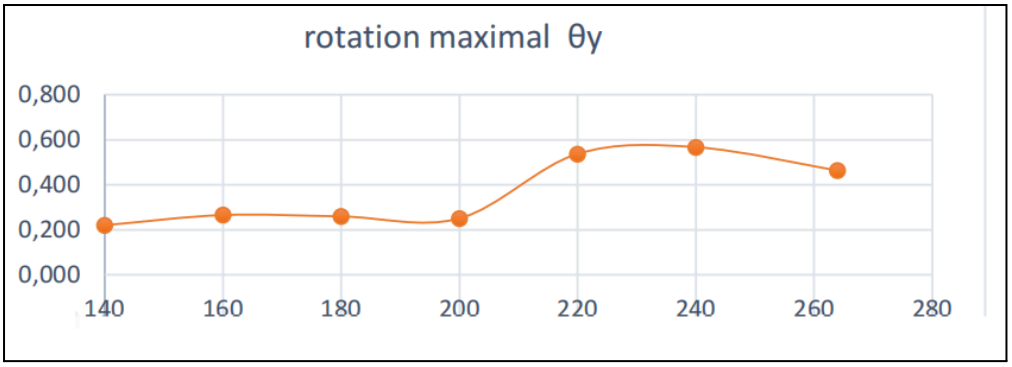


Figure IX.20 : Rotation maximale en fonction de la vitesse de franchissement

La rotation maximale se trouve pour la vitesse 240 Km/h, elle correspond au convoi A7

$$\theta_{adm} = \frac{0.005}{3.5} = 1.42 \text{ mRad}$$

$$\theta_{max} = 0.467 \text{ mRad}$$

$\theta_{adm} < \theta_{max}$ la condition est **vérifiée**

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail de fin d'études est une étape majeure dans la formation d'un élève ingénieur.

Ce projet nous a permis de mettre en pratique les connaissances théoriques acquises tout au long de notre cursus, tout en développant notre méthodologie de travail, notre esprit d'analyse ainsi que notre capacité à traiter un projet de génie civil avec de réelles contraintes.

Le but de ce travail était d'étudier et de dimensionner un ouvrage d'art de type pont, en tenant compte des différentes contraintes techniques, réglementaires et constructives. Cette étude a suivi les différentes étapes de conception de l'ouvrage, du choix de la variante structurelle au dimensionnement du tablier, des appuis, des fondations et des équipements du pont. Cette expérience nous a permis d'approfondir nos connaissances dans plusieurs domaines du génie civil, notamment la résistance des matériaux, le béton armé, la géotechnique et la modélisation numérique des structures. L'utilisation de logiciels spécialisés de calcul et de modélisation nous a également permis de mieux comprendre le comportement réel de l'ouvrage sous l'effet des différentes sollicitations appliquées.

L'exemple d'un pont montre bien le caractère multidisciplinaire des ouvrages d'art, qui requièrent à la fois des compétences techniques, une bonne maîtrise des règlements et une réflexion constructive pour assurer la sécurité, la stabilité et la durabilité de l'ouvrage.

Enfin, ce projet est une expérience enrichissante à la fois sur le plan technique et personnel. Il représente une synthèse des compétences acquises au cours de notre formation et une excellente préparation à notre future intégration dans le monde professionnel.

BIBLIOGRAPHIE

[1] BAEL, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, BAEL 91 révisé 99, 1999

[2] CCM97 : Règles de conception et de calcul des structures en acier Document d'Application Nationale. Partie 1-5 : Règles générales -Règles supplémentaires pour les plaques planes raidies ou non, chargées dans leur plan.

[3] Document SETRA, ponts mixtes acier-béton bi-poutres, Guide de conception 2007

[4] Document SETRA, Ponts courants en zone sismique, Ministère de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer (France), janvier 2000.

[5] Document SETRA :Guide technique, appareil d'appuis à pot, utilisation sur les ponts, viaduc et structures similaires,Novembre 2007.

[6] Eurocodes 1 "action sur les structures", 3 "calcul des structures en acier" et 4 "calcul des structures mixtes acier-béton"

[7] Mémoire de fin d'études "CONCEPTION ET ETUDE D'UN VIADUC AU PK 25+575 AU PK 26+125 DE LA LIGNE MINIÈRE TEBESSA" réalisé par ZINAI Larbi Ryad et HENNA Youcef.

[8] Mémoire de fin d'études "CONCEPTION ET ÉTUDE D'UN PONT FERROVIAIRE SUR OUED EL HARRACH AU PK 11+155.37" réalisé par BOUBAKEUR Echeima et LEMAISSI Kahina.

[9] RCPR, Règles Définissant Les Charges À Appliquer Pour Le Calcul Et Les Épreuves Des Ponts Routes, Algérie, 2009.

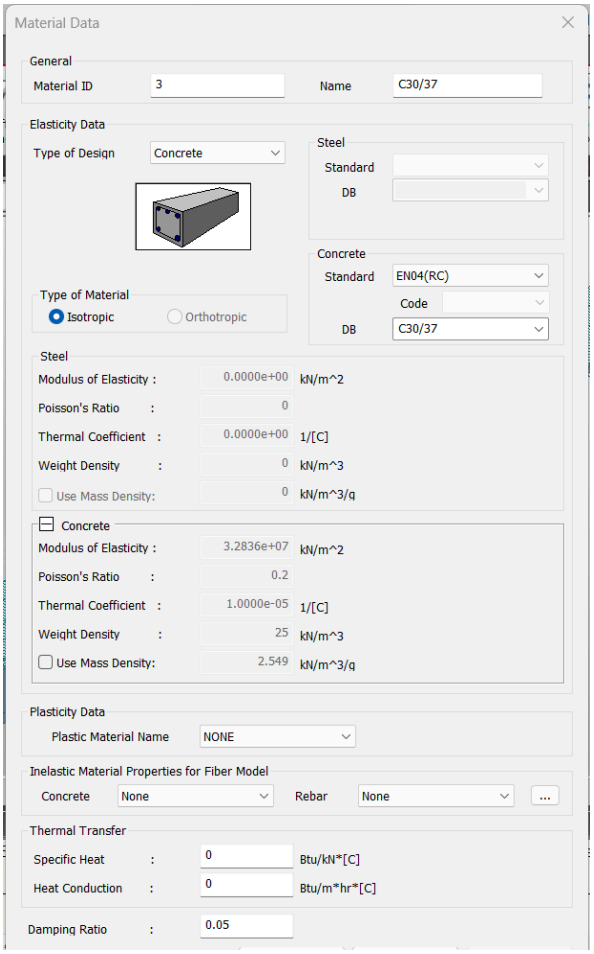
[10] RPOA, Règles Parasismiques Applicables au domaine des Ouvrages d'Art, Algérie, 2008.

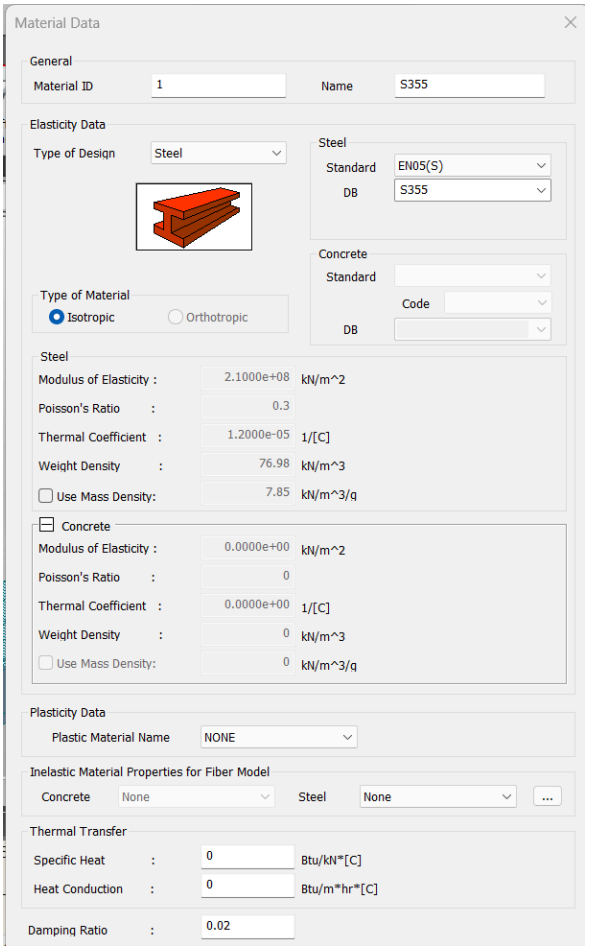
ANNEXES

ANNEXE A

Modélisation avec MIDAS

1. définition des matériaux

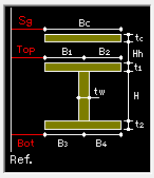




2. définition des sections

➢ Tablier 01

Section ID 1 Name S1



Section Type : Steel-I (Type2)

Symmetric Section Auto Calculation

Distance from Reference Line

Sq 0 Top 2.8 Bot. 2.7 m

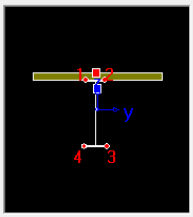
Slab

Bc 6.8 tc 0.4 Hh 0 m

Girder

B1	0.5	B6	0	tw2	0	m
B2	0.5	H	3.43	bf1	0	m
B3	0.6	t1	0.03	bf2	0	m
B4	0.6	t2	0.04	tfp	0	m
B5	0	tw	0.03			m

Stiffener...



Material

Select Material from DB ...

Es / Ec	6.395419	Ds / Dc	3.0792
Ps	0.3	Pc	0.2
Ts / Tc	1.2		

Multiple Modulus of Elasticity

Es/Ec (Creep) 0

Es/Ec (Shrinkage) 0

Display Centroid

FEM Equation

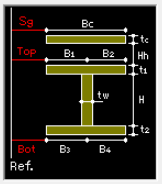
Offset : Left-Top

Change Offset ...

Consider Shear Deformation.

Consider Warping Effect(7th DOF)

Section ID 2 Name S2



Section Type : Steel-I (Type2)

Symmetric Section Auto Calculation

Distance from Reference Line

Sq 0 Top 2.8 Bot. 2.7 m

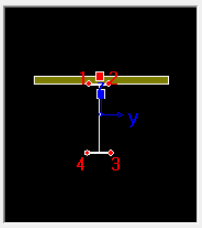
Slab

Bc 6.8 tc 0.4 Hh 0 m

Girder

B1	0.5	B6	0	tw2	0	m
B2	0.5	H	3.41	bf1	0	m
B3	0.6	t1	0.04	bf2	0	m
B4	0.6	t2	0.05	tfp	0	m
B5	0	tw	0.03			m

Stiffener...



Material

Select Material from DB ...

Es / Ec	6.395419	Ds / Dc	3.0792
Ps	0.3	Pc	0.2
Ts / Tc	1.2		

Multiple Modulus of Elasticity

Es/Ec (Creep) 0

Es/Ec (Shrinkage) 0

Display Centroid

FEM Equation

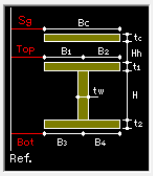
Offset : Left-Top

Change Offset ...

Consider Shear Deformation.

Consider Warping Effect(7th DOF)

Section ID 3 Name S3



Section Type : Steel-I (Type2)

Symmetric Section Auto Calculation

Distance from Reference Line

Sq 0 Top 2.8 Bot. 2.7 m

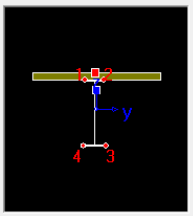
Slab

Bc 6.8 tc 0.4 Hh 0 m

Girder

B1	0.5	B6	0	tw2	0	m
B2	0.5	H	3.39	bf1	0	m
B3	0.6	t1	0.05	bf2	0	m
B4	0.6	t2	0.06	tfp	0	m
B5	0	tw	0.03			m

Stiffener...



Material

Select Material from DB ...

Es / Ec	6.395419	Ds / Dc	3.0792
Ps	0.3	Pc	0.2
Ts / Tc	1.2		

Multiple Modulus of Elasticity

Es/Ec (Creep) 0

Es/Ec (Shrinkage) 0

Display Centroid

FEM Equation

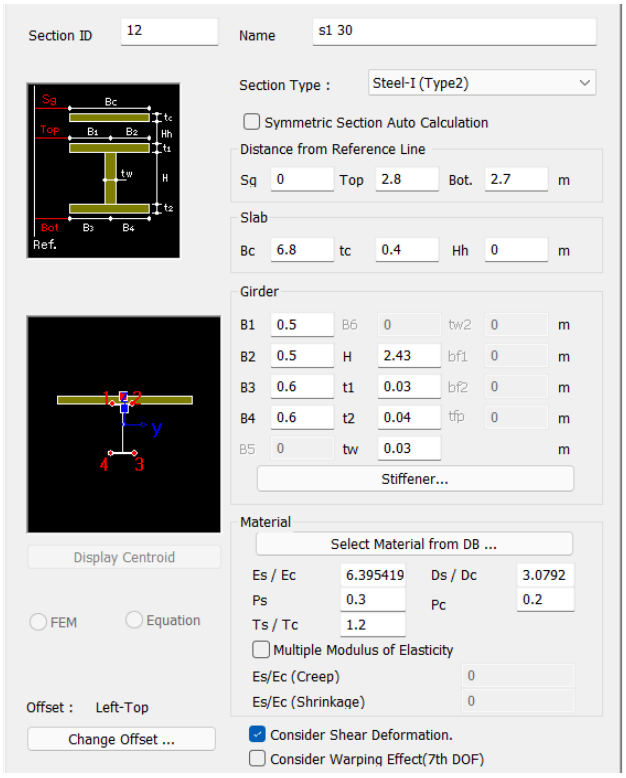
Offset : Left-Top

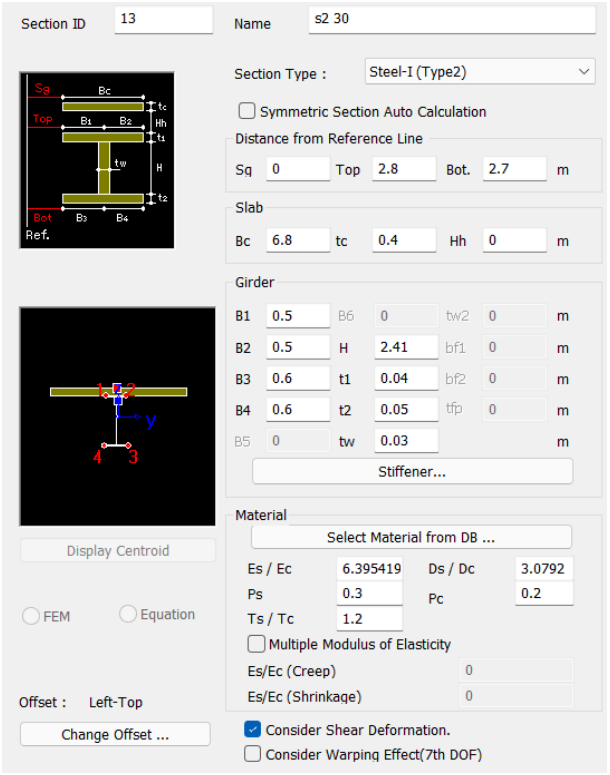
Change Offset ...

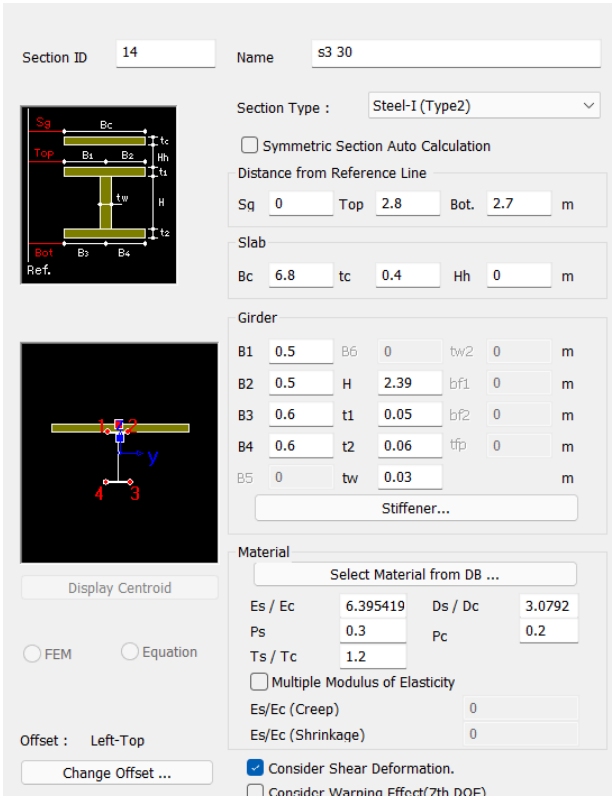
Consider Shear Deformation.

Consider Warping Effect(7th DOF)

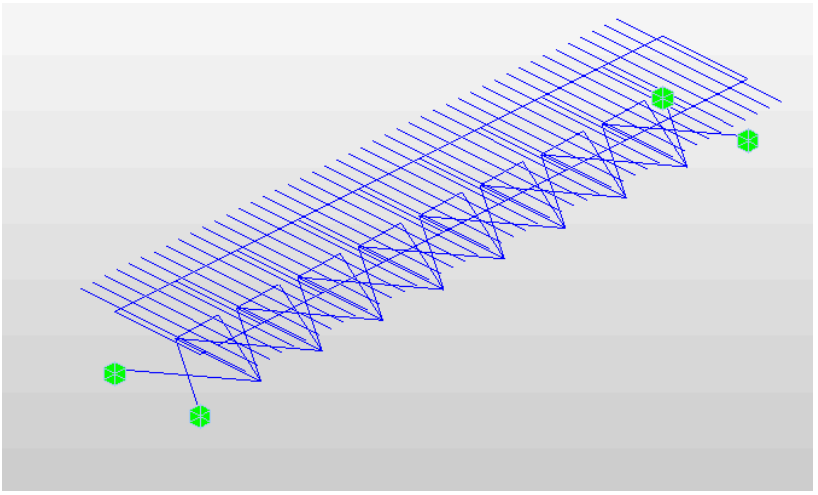
➢ Tablier 02


Section ID 12
Name s1 30
Section Type : Steel-I (Type2)
Symmetric Section Auto Calculation
Distance from Reference Line
Sq 0 Top 2.8 Bot. 2.7 m
Slab
Bc 6.8 tc 0.4 Hh 0 m
Girder
B1 0.5 B6 0 tw2 0 m
B2 0.5 H 2.43 bf1 0 m
B3 0.6 t1 0.03 bf2 0 m
B4 0.6 t2 0.04 tfp 0 m
B5 0 tw 0.03 m
Stiffener...
Material
Select Material from DB ...
Es / Ec 6.395419 Ds / Dc 3.0792
Ps 0.3 Pc 0.2
Ts / Tc 1.2
Multiple Modulus of Elasticity
Es/Ec (Creep) 0
Es/Ec (Shrinkage) 0
Display Centroid
FEM Equation
Offset : Left-Top
Change Offset ...
Consider Shear Deformation.
Consider Warping Effect(7th DOF)

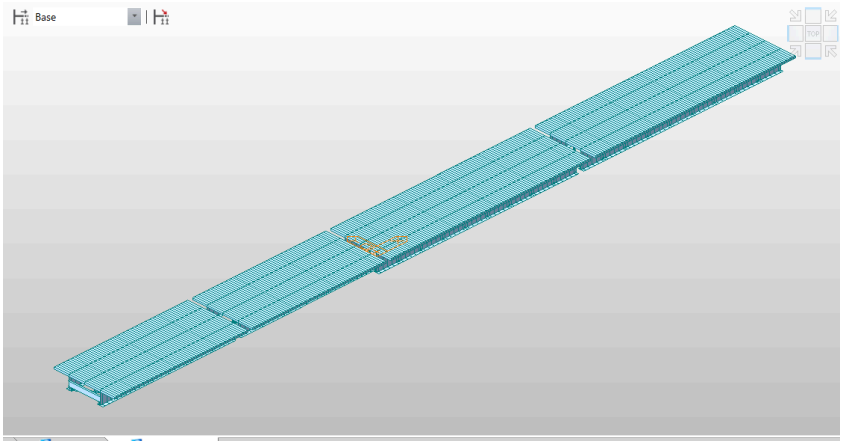

Section ID 13
Name s2 30
Section Type : Steel-I (Type2)
Symmetric Section Auto Calculation
Distance from Reference Line
Sq 0 Top 2.8 Bot. 2.7 m
Slab
Bc 6.8 tc 0.4 Hh 0 m
Girder
B1 0.5 B6 0 tw2 0 m
B2 0.5 H 2.41 bf1 0 m
B3 0.6 t1 0.04 bf2 0 m
B4 0.6 t2 0.05 tfp 0 m
B5 0 tw 0.03 m
Stiffener...
Material
Select Material from DB ...
Es / Ec 6.395419 Ds / Dc 3.0792
Ps 0.3 Pc 0.2
Ts / Tc 1.2
Multiple Modulus of Elasticity
Es/Ec (Creep) 0
Es/Ec (Shrinkage) 0
Display Centroid
FEM Equation
Offset : Left-Top
Change Offset ...
Consider Shear Deformation.
Consider Warping Effect(7th DOF)

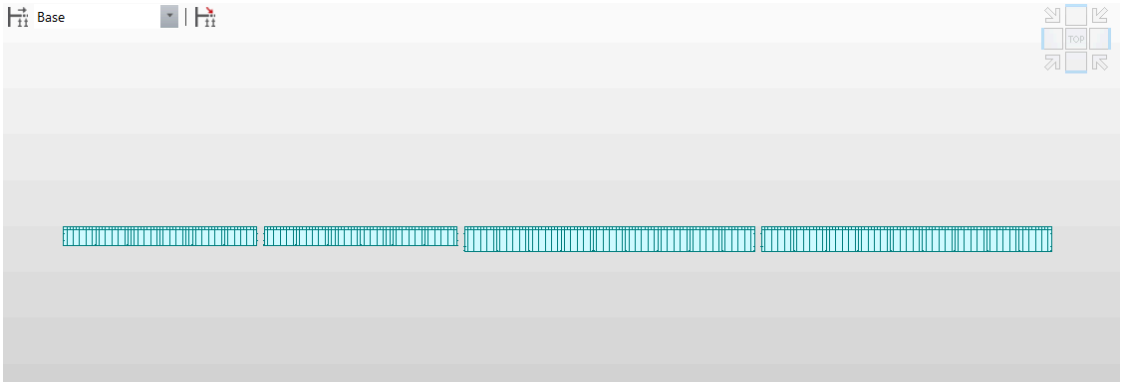

Section ID 14
Name s3 30
Section Type : Steel-I (Type2)
Symmetric Section Auto Calculation
Distance from Reference Line
Sq 0 Top 2.8 Bot. 2.7 m
Slab
Bc 6.8 tc 0.4 Hh 0 m
Girder
B1 0.5 B6 0 tw2 0 m
B2 0.5 H 2.39 bf1 0 m
B3 0.6 t1 0.05 bf2 0 m
B4 0.6 t2 0.06 tfp 0 m
B5 0 tw 0.03 m
Stiffener...
Material
Select Material from DB ...
Es / Ec 6.395419 Ds / Dc 3.0792
Ps 0.3 Pc 0.2
Ts / Tc 1.2
Multiple Modulus of Elasticity
Es/Ec (Creep) 0
Es/Ec (Shrinkage) 0
Display Centroid
FEM Equation
Offset : Left-Top
Change Offset ...
Consider Shear Deformation.

3. Conditions d’appuis



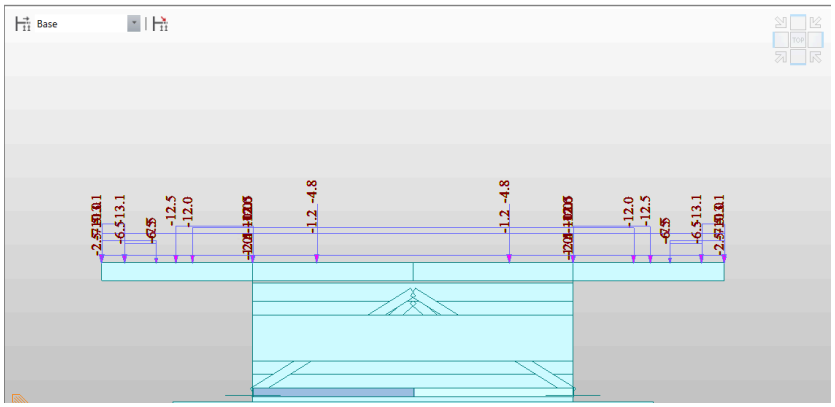
4. vue d’ensemble des deux tabliers



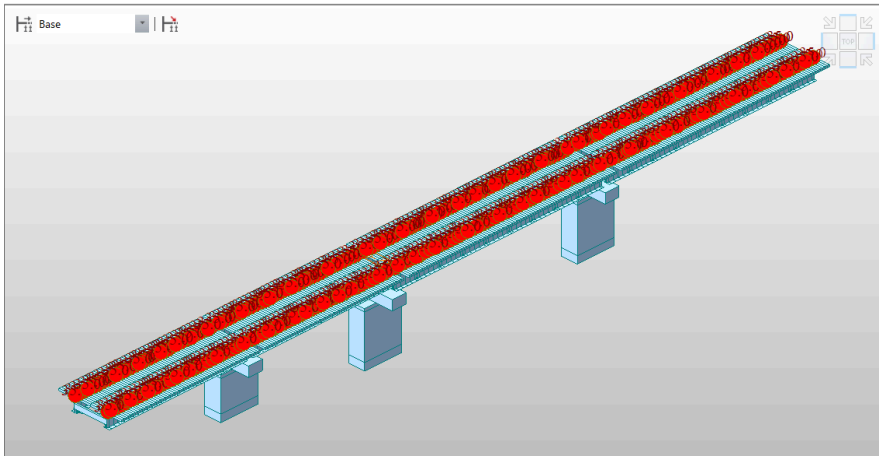


5. définition des charges et surcharges

charges complémentaire permanentes



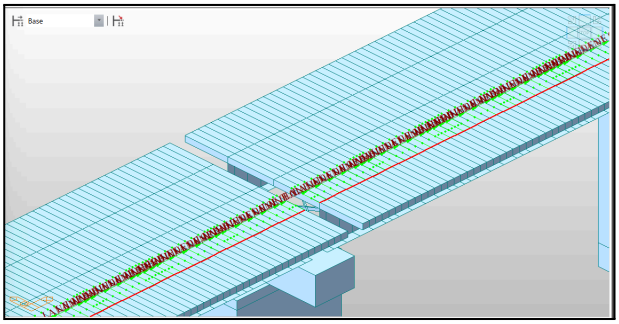
charges de température

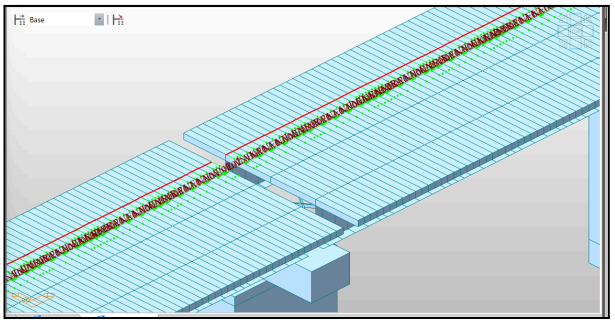


charges mobiles



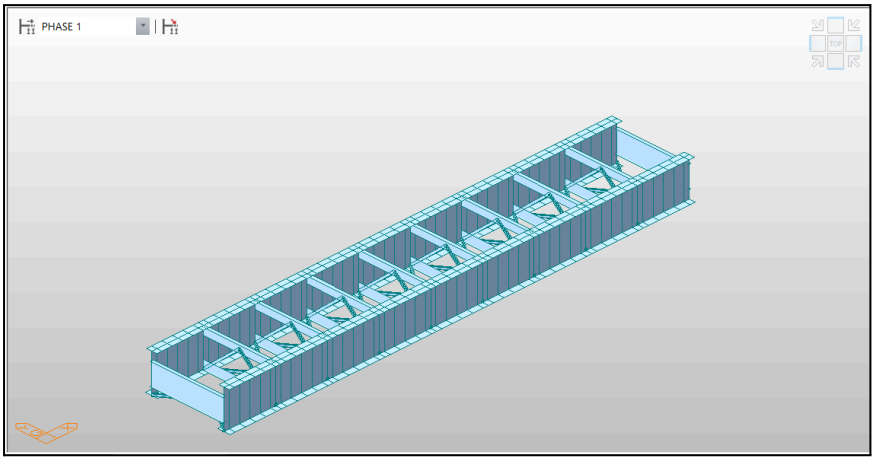
lignes ferroviaires



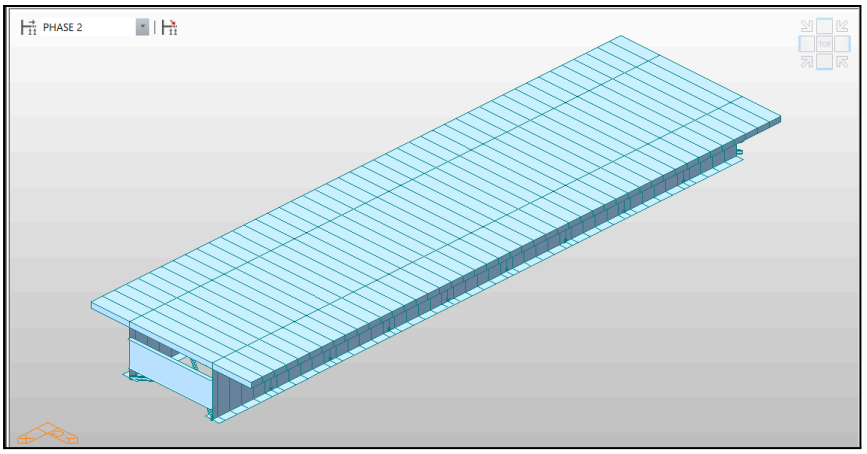


6. Définition des phases de construction

phase 01



Phase 02



7. Flèche due aux différentes charges

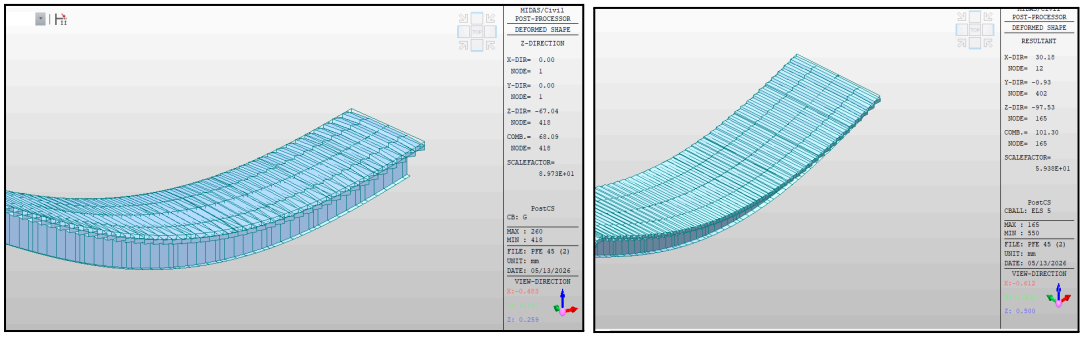


Figure: Tablier 01 sous charge permanente et ELS 5

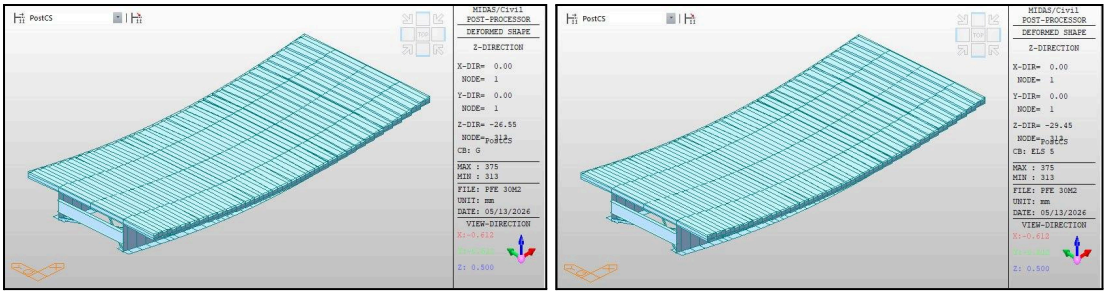


Figure:Tablier 02 sous charge permanente et ELS 5

8. Infrastructure

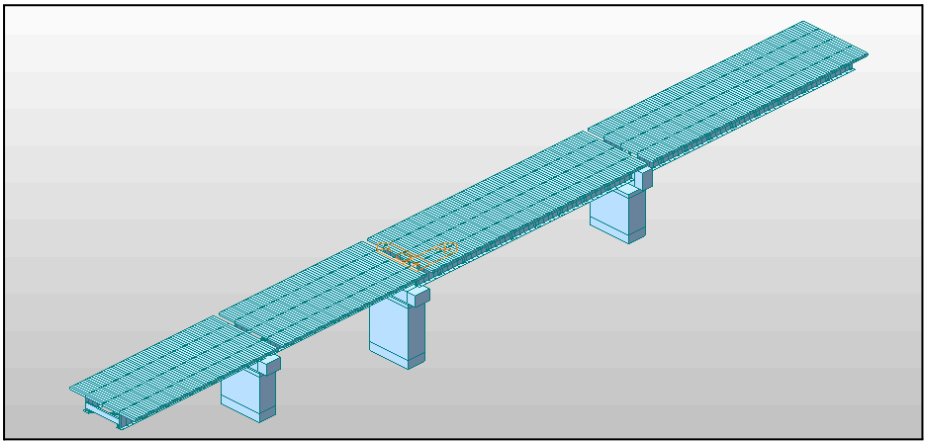


Figure: vue d'ensemble de l'ouvrage

9. Déplacement des piles

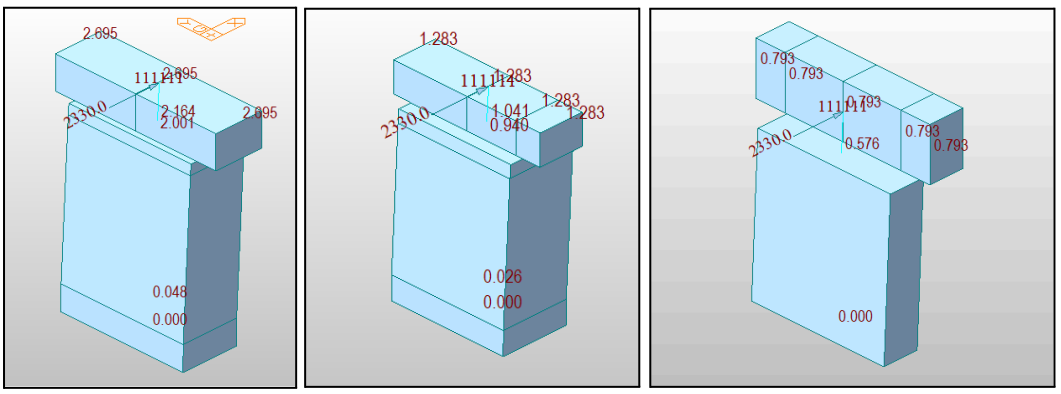


Figure: Déplacement des piles de catégorie 01/02/03

ANNEXE B
DIAGRAMMES DES EFFORTS SOLLICITANT L'OUVRAGE

➢ Tablier 01

Phase 01

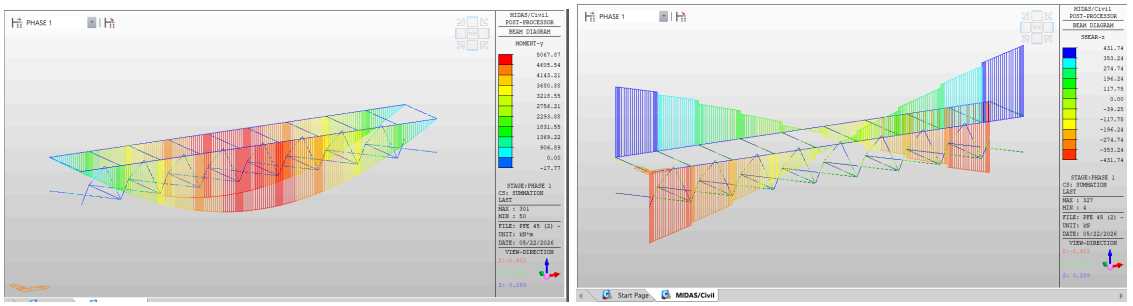


Figure : diagrammes du moment et de l'effort tranchant 1.1

Phase 02

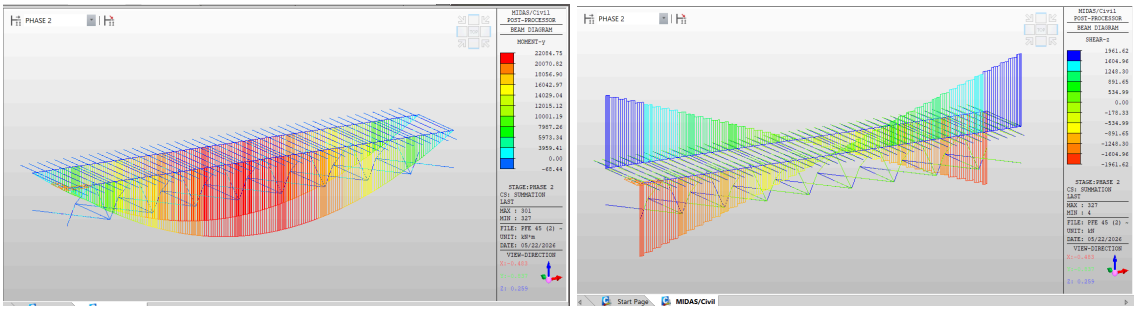


Figure : diagrammes du moment et de l'effort tranchant 1.2

Phase 04

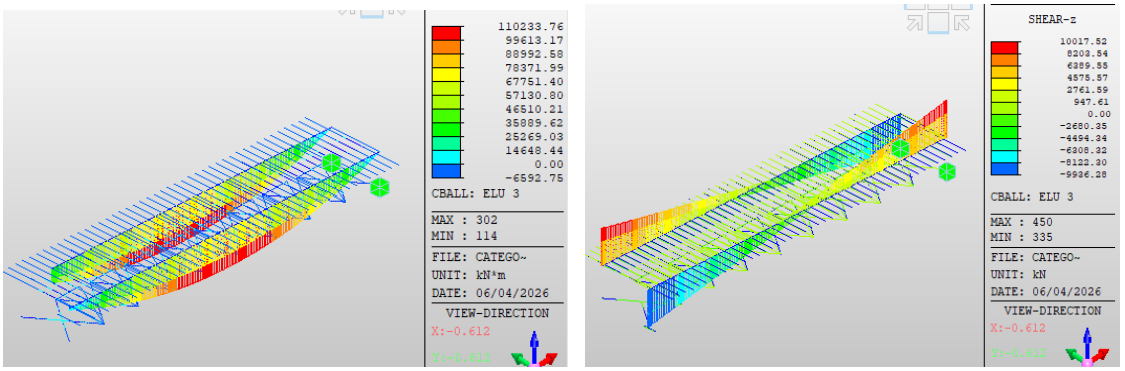


Figure : diagrammes du moment et de l'effort tranchant ELU 1.4

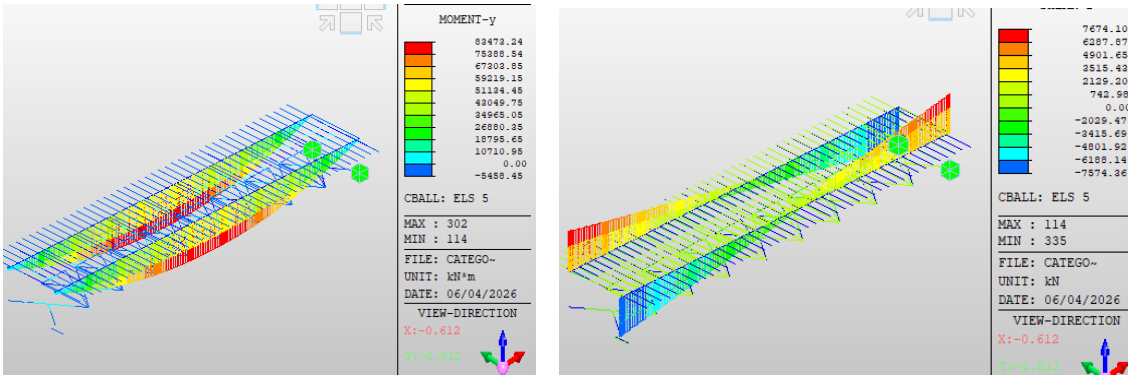


Figure : diagrammes du moment et de l'effort tranchant ELS 1.4

➢ Tablier 02

Phase 01

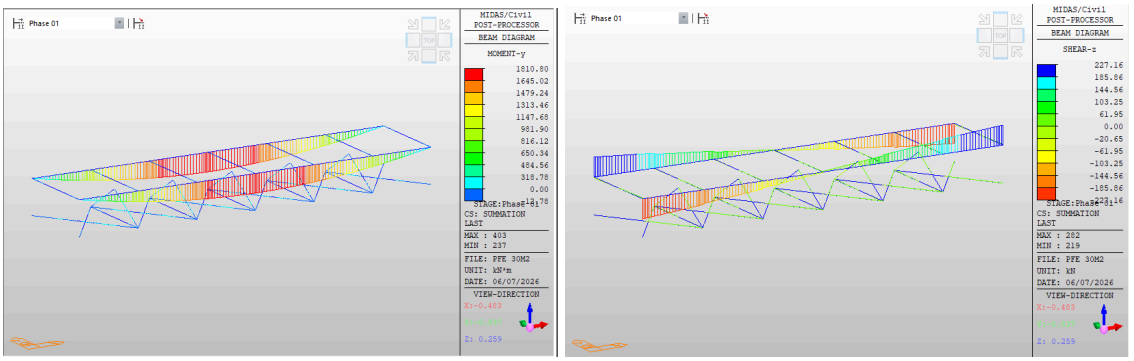


Figure : diagrammes du moment et de l'effort tranchant 2.1

Phase 02

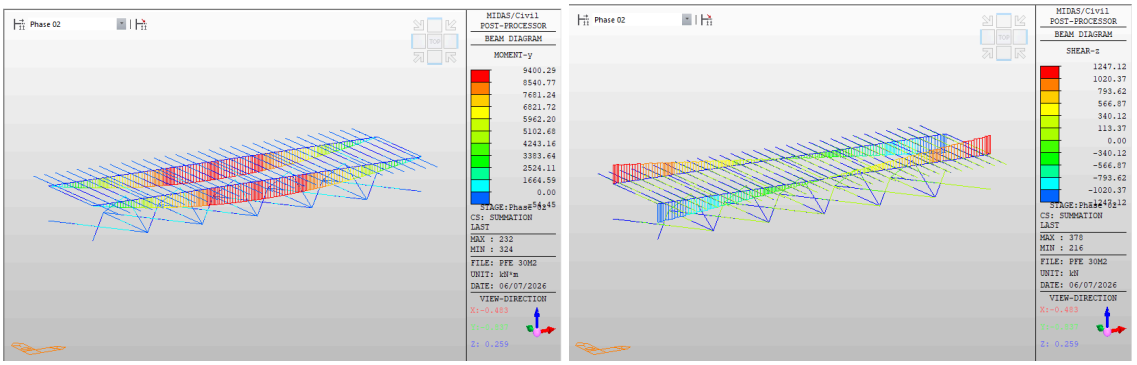


Figure : diagrammes du moment et de l'effort tranchant 2.2

Phase 03

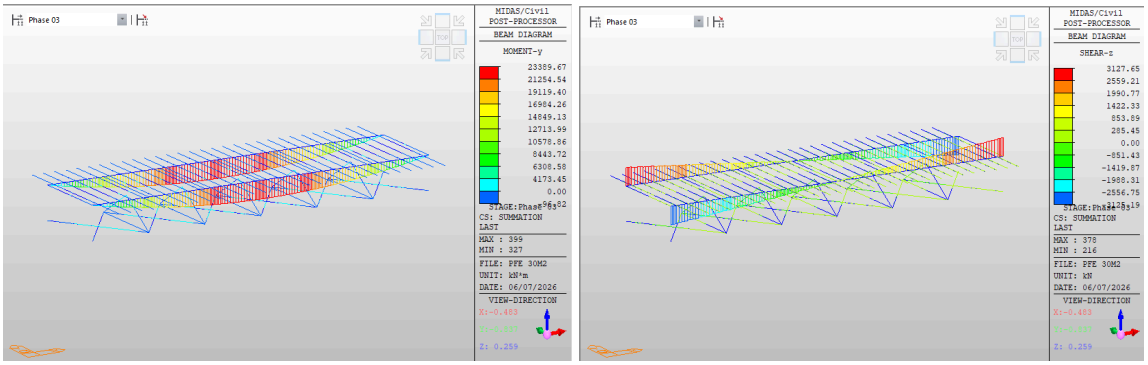
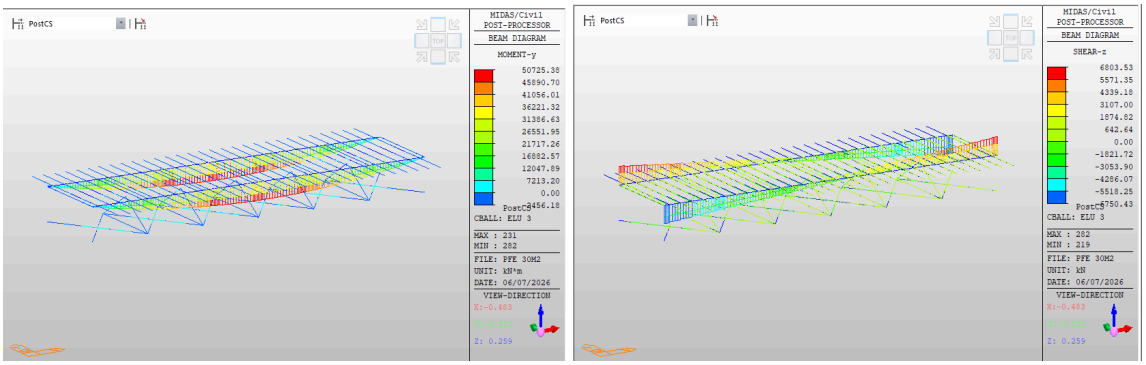


Figure : diagrammes du moment et de l'effort tranchant 2.3

Phase 04



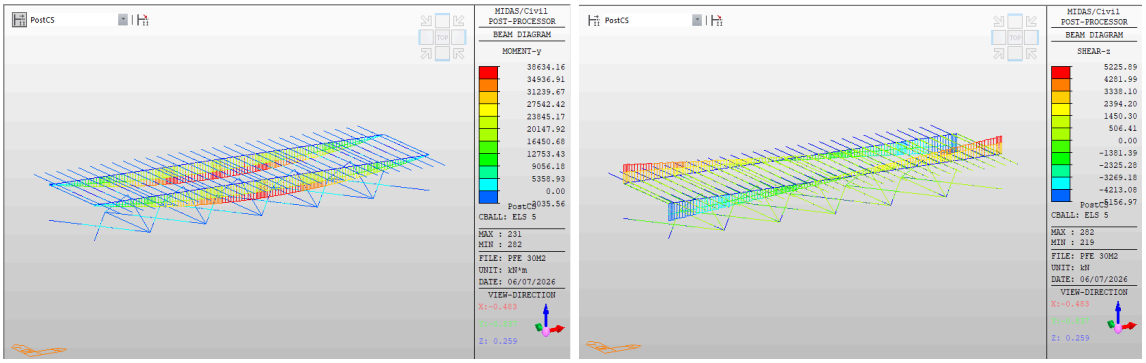


Figure : diagrammes du moment et de l'effort tranchant 2.4

ANNEXE C
Essais géotechniques

1. résultats de l'essai SPT

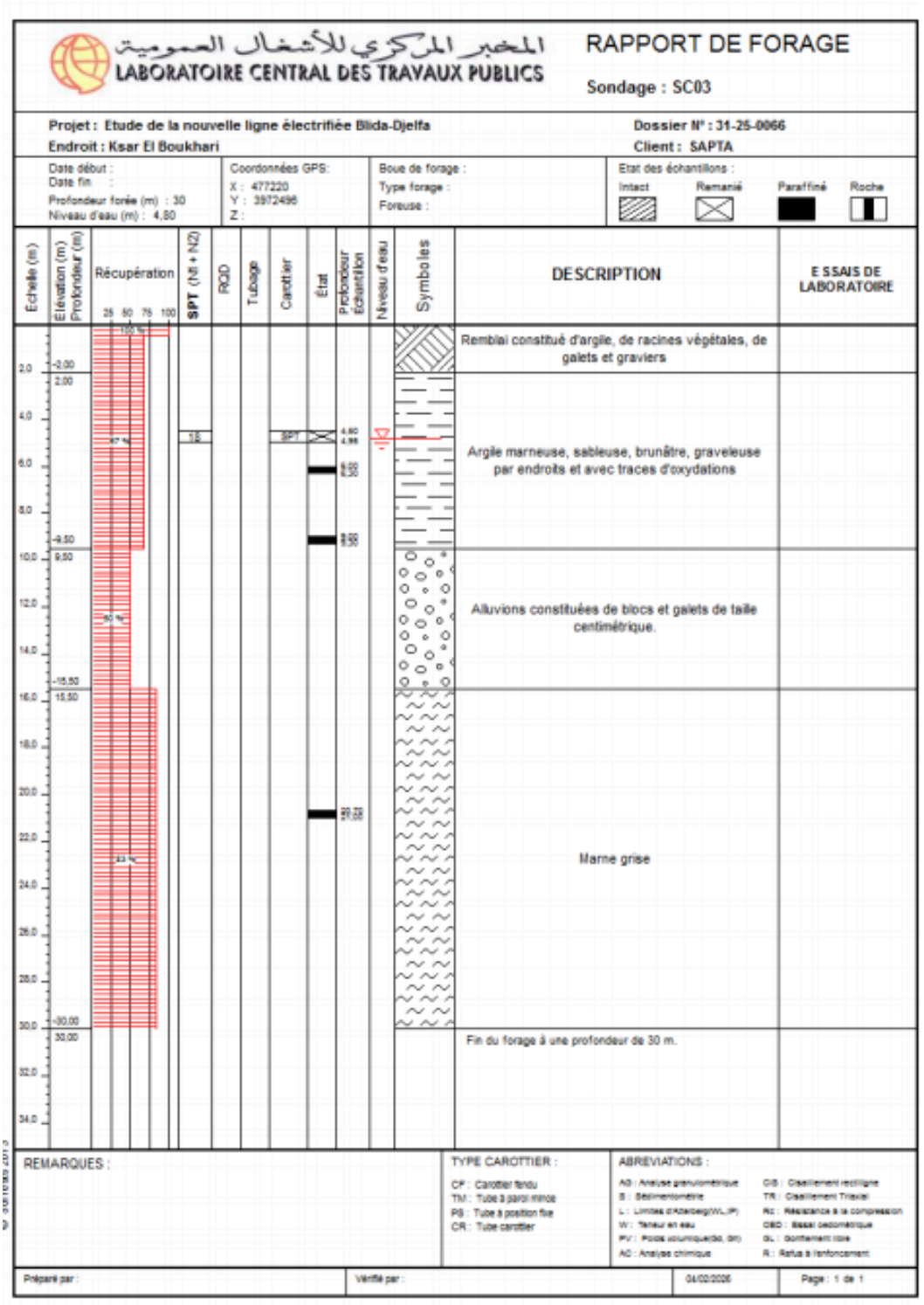
Tableau : résultats du SPT concernant la nature du sol

Sondage	profondeur (m)	N0	N1	N2	N	Nature du sol
SC 03	**4.5 - 4.95**	8	11	7	18	argile marneuse
SC 08	**4.50 – 4.95**	2	2	3	5	argile marneuse
	7.50 – 7.95	4	7	8	15	
	13.50 – 13.95	7	10	12	27	
	16.50 – 16.95	13	15	12	27	

Tableau: résultats concernant les caractéristiques du sol

Sondage	profondeur (m)	ω(%)	γ_h (t/m3)	γ_d (t/m3)	S_r(%)	Observations
SC 03	**06.00 – 6.30**	21.30	1.90	1.57	82.05	Sol de densité moyenne, non saturé.
	20.70 – 21.00	9.80	2.33	2.12	100	Sol de densité élevée, saturé
SC 08	**04.30 – 04.50**	21.50	1.82	1.50	74.32	Sol de densité moyenne, non saturé.
	16.30 – 16.50	20.90	1.89	1.56	79.27	Sol de densité moyenne, non saturé.

Résultats du sondage SC 03



المخبر المركزي للأشغال العمومية
LABORATOIRE CENTRAL DES TRAVAUX PUBLICS

RAPPORT DE FORAGE

Sondage : SC03

Projet : Etude de la nouvelle ligne électrifiée Blida-Djelfa — Dossier N° : 31-25-0066
Endroit : Ksar El Boukhari — Client : SAPTA

Date début :
Date fin :
Profondeur forée (m) : 30
Niveau d'eau (m) : 4,80

Coordonnées GPS:
X : 477220
Y : 3972496
Z :

Boue de forage :
Type forage :
Foreuse :

Etat des échantillons : Intact — Remanié — Paraffiné — Roche

Echelle (m)	Elévation (m) / Profondeur (m)	Récupération (25 50 75 100)	SPT (N1 + N2)	RQD	Tubage	Carottier	État	Profondeur échantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	ESSAIS DE LABORATOIRE
2,0	-2,00 / 2,00	100 %									Remblai constitué d'argile, de racines végétales, de galets et graviers	
4,0		47 %	18			SPT		4,80 / 4,95			Argile marneuse, sableuse, brunâtre, graveleuse par endroits et avec traces d'oxydations	
6,0								6,00 / 6,50				
8,0	-8,50 / 8,50							8,00 / 8,50				
10,0		80 %									Alluvions constituées de blocs et galets de taille centimétrique.	
12,0												
14,0	-15,50 / 15,50											
16,0		33 %									Marne grise	
18,0												
20,0								20,00 / 20,50				
22,0												
24,0												
26,0												
28,0												
30,0	-30,00 / 30,00										Fin du forage à une profondeur de 30 m.	
32,0												
34,0												

REMARQUES :

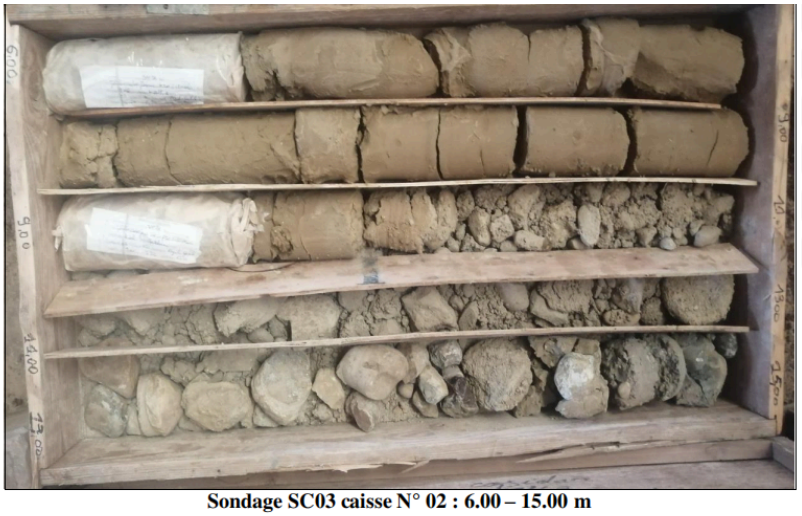
TYPE CAROTTIER :
CF : Carottier fendu
TM : Tube à paroi mince
PS : Tube à position fixe
CR : Tube carottier

ABREVIATIONS :
AG : Analyse granulométrique — GIS : Cisaillement rectiligne
S : Sédimentométrie — TR : Cisaillement Triaxial
L : Limites d'Atterberg(WL,IP) — RC : Résistance à la compression
W : Teneur en eau — OED : Essai oedométrique
PV : Poids volumique(dd, dh) — GL : Gonflement libre
AC : Analyse chimique — R : Refus à l'enfoncement

Préparé par : — Vérifié par : — 04/02/2026 — Page : 1 de 1



Sondage SC03 : caisse N°01 : 0.00 – 6.00 m



Sondage SC03 caisse N° 02 : 6.00 – 15.00 m



Sondage SC03 caisse N° 03 : 15.00 – 21.00 m



Sondage SC03 caisse N° 04 : 21.00 – 27.00 m



Sondage SC03 caisse N° 05 : 27.00 – 30.00 m

Résultats du sondage SC 08

المخبر المركزي للأشغال العمومية
LABORATOIRE CENTRAL DES TRAVAUX PUBLICS

RAPPORT DE FORAGE

Sondage : SC08

Projet : Etude de la nouvelle ligne électrifiée Blida-Djelfa
Endroit : PK3+993.15 au PK5+705.95

Dossier N° : 31-25-0066
Client : SAPTA

Date début :
Date fin :
Profondeur forée (m) : 30
Niveau d'eau (m) : 4

Coordonnées GPS:
X : 476882.87
Y : 3971911.79
Z :

Boue de forage : Boue
Type forage : carotté
Foreuse :

Etat des échantillons :
Intact | Remanié | Paraffiné | Roche

Echelle (m)	Élévation (m) / Profondeur (m)	Récupération (25 50 75 100)	SPT (Nb + N2)	RQD	Tubage	Carottier	État	Profondeur Échantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	ESSAIS DE LABORATOIRE
	0.00	50 %									Terre végétal brunâtre	
	0.40											
2.0												
4.0			4			SPT		4.00 4.45				
6.0												
8.0			15			SPT		7.90 7.95				
10.0		98 %									Argile marneuse,sableuse,brunâtre,graveleuse par endroits et avec traces d'oxydations.	
12.0												
14.0			22			SPT		13.50 13.95				
16.0												
18.0	-16.40		27			SPT		16.90 16.95				
	18.40	42 %									Alluvion constitué de blocs, galets de tailles centimétrique.	
20.0	-20.80											
22.0	20.80											
24.0								23.10 23.40			Marne grisâtre.	
26.0		61 %										
28.0												
30.0	-30.00											
	30.00										Fin du forage à une profondeur de 30 m.	
32.0												
34.0												

REMARQUES :

TYPE CAROTTIER :
CF : Carottier fendu
TM : Tube à paroi mince
PS : Tube à position fixe
CR : Tube carottier

ABREVIATIONS :
AG : Analyse granulométrique
S : Sédimentométrie
L : Limites d'Atterberg(WL,IP)
W : Teneur en eau
PV : Poids volumique(dd, dh)
AC : Analyse chimique
CIS : Cisaillement rectiligne
TR : Cisaillement Triaxial
Rc : Résistance à la compression
OED : Essai oedométrique
GL : Gonflement libre
R : Refus à l'enfoncement

Préparé par :
Vérifié par :
04/02/2026
Page : 1 de 1

© SolTests 2013



Sondage SC08 : caisse N°01 : 0.00 – 7.50 m



Sondage SC08 caisse N° 02 : 7.50 – 15.00 m



Sondage SC08 caisse N° 03 : 15.00 – 22.50 m



Sondage SC08 caisse N° 04 : 22.50 – 28.50 m



Sondage SC08 caisse N° 05 : 28.50 – 30.00 m

2. résultats des essais pressiométriques

Résultats du sondage SP 01

Compté à partir de l'excavation de 4.20 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl*(bar)	Pl*(bar)	Ple*(bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40:	11.80]	37.967	47.359	43.5138	1.30	56.5680	639.4445	3.77	162.78
10.50	1.20	1.13	[9.90:	12.30]	39.120	47.332	45.3488	1.30	58.9535	666.4102	3.77	189.17
11.00	1.20	1.13	[10.40:	12.80]	42.552	47.284	46.7447	1.80	84.1404	951.1231	3.77	210.46
11.50	1.20	1.13	[10.90:	13.30]	46.555	47.267	47.3105	1.80	85.1589	962.6362	3.77	242.66
12.00	1.20	1.13	[11.40:	13.80]	47.357	47.269	47.3088	1.80	85.1559	962.6023	3.77	260.24
12.50	1.20	1.13	[11.90:	14.30]	47.360	47.242	47.2886	1.80	85.1195	962.1911	3.77	293.09
13.00	1.20	1.13	[12.40:	14.80]	47.322	47.194	47.2622	1.80	85.0719	961.6528	3.77	311.64
13.50	1.20	1.13	[12.90:	15.30]	47.275	47.147	47.2355	1.80	85.0239	961.1102	3.77	344.93
14.00	1.20	1.13	[13.40:	15.80]	47.267	47.099	47.2055	1.80	84.9699	960.4997	3.77	364.31
14.50	1.20	1.13	[13.90:	16.30]	47.270	47.052	47.1653	1.80	84.8975	959.6816	3.77	397.90
15.00	1.20	1.13	[14.40:	16.80]	47.232	47.004	47.1180	1.80	84.8124	958.7194	3.77	418.00
15.50	1.20	1.13	[14.90:	17.30]	47.185	46.957	47.0705	1.80	84.7269	957.7529	3.77	451.78
16.00	1.20	1.13	[15.40:	17.80]	47.137	46.909	47.0230	1.80	84.6414	956.7864	3.77	472.51
16.50	1.20	1.13	[15.90:	18.30]	47.090	46.862	46.9755	1.80	84.5559	955.8199	3.77	506.42
17.00	1.20	1.13	[16.40:	18.80]	47.042	46.814	46.9280	1.80	84.4704	954.8534	3.77	527.70
17.50	1.20	1.13	[16.90:	19.30]	46.995	46.767	46.8805	1.80	84.3849	953.8869	3.77	561.68
18.00	1.20	1.13	[17.40:	19.80]	46.947	46.719	46.8330	1.80	84.2994	952.9204	3.77	583.45
18.50	1.20	1.13	[17.90:	20.30]	46.900	46.672	46.7855	1.80	84.2139	951.9539	3.77	617.47
19.00	1.20	1.13	[18.40:	20.80]	46.852	46.624	46.7380	1.80	84.1284	950.9874	3.77	639.69
19.50	1.20	1.13	[18.90:	21.30]	46.805	46.577	46.6905	1.80	84.0429	950.0209	3.77	673.72
20.00	1.20	1.13	[19.40:	21.80]	46.757	46.529	46.6430	1.80	83.9574	949.0544	3.77	696.33
20.50	1.20	1.13	[19.90:	22.30]	46.710	46.512	46.5974	1.80	83.8753	948.1261	3.77	730.34
21.00	1.20	1.13	[20.40:	22.80]	46.662	46.514	46.5613	1.80	83.8104	947.3928	3.77	753.31
21.50	1.20	1.13	[20.90:	23.30]	46.615	46.487	46.5338	1.80	83.7609	946.8332	3.77	787.31
22.00	1.20	1.13	[21.40:	23.80]	46.567	46.439	46.5072	1.80	83.7129	946.2906	3.77	810.60
22.50	1.20	1.13	[21.90:	24.30]	46.520	46.392	46.4805	1.80	83.6649	945.7480	3.77	844.55
23.00	1.20	1.13	[22.40:	24.80]	46.512	46.344	46.4505	1.80	83.6109	945.1376	3.77	868.15
23.50	1.20	1.13	[22.90:	25.30]	46.515	46.297	46.4103	1.80	83.5385	944.3195	3.77	902.06
24.00	1.20	1.13	[23.40:	25.80]	46.477	46.249	46.3630	1.80	83.4534	943.3572	3.77	925.92
24.50	1.20	1.13	[23.90:	26.30]	46.430	46.202	46.3155	1.80	83.3679	942.3907	3.77	959.78
25.00	1.20	1.13	[24.40:	26.80]	46.382	46.154	46.2680	1.80	83.2824	941.4242	3.77	983.90
25.50	1.20	1.13	[24.90:	27.30]	46.335	46.107	46.2205	1.80	83.1969	940.4578	3.77	1017.71
26.00	1.20	1.13	[25.40:	27.80]	46.287	46.059	46.1730	1.80	83.1114	939.4913	3.77	1042.05

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax(t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	433.67	294.54	113.94	802.22	-116.27	573.02	-125.21	668.52	-81.39	394.24	0	309.76
10.50	465.62	316.72	132.42	855.58	-135.12	611.13	-145.51	712.98	-94.58	423.29	0	332.59
11.00	622.88	422.27	147.32	1161.58	-150.33	829.70	-161.89	967.99	-105.23	566.26	0	444.92
11.50	651.18	442.21	169.86	1205.29	-173.33	860.92	-186.66	1004.41	-121.33	591.98	0	465.13
12.00	663.47	450.99	182.17	1222.84	-185.89	873.46	-200.19	1019.04	-130.12	603.16	0	473.91
12.50	686.26	467.28	205.16	1255.28	-209.35	896.63	-225.46	1046.07	-146.55	623.87	0	490.19
13.00	698.98	476.37	218.15	1273.29	-222.60	909.50	-239.72	1061.08	-155.82	635.43	0	499.27
13.50	722.01	492.84	241.45	1306.04	-246.38	932.89	-265.33	1088.37	-172.47	656.37	0	515.72
14.00	735.27	502.32	255.02	1324.81	-260.22	946.29	-280.24	1104.01	-182.16	668.43	0	525.19
14.50	758.37	518.84	278.53	1357.58	-284.21	969.70	-306.08	1131.32	-198.95	689.43	0	541.69
15.00	771.96	528.57	292.60	1376.72	-298.57	983.37	-321.54	1147.26	-209.00	701.78	0	551.40
15.50	795.12	545.14	316.25	1409.53	-322.70	1006.81	-347.52	1174.61	-225.89	722.84	0	567.95
16.00	809.15	555.18	330.75	1429.29	-337.50	1020.92	-363.47	1191.08	-236.25	735.59	0	577.96
16.50	832.40	571.82	354.49	1462.24	-361.73	1044.46	-389.55	1218.53	-253.21	756.73	0	594.57
17.00	846.81	582.13	369.39	1482.55	-376.93	1058.96	-405.92	1235.46	-263.85	769.83	0	604.87
17.50	870.12	598.80	393.18	1515.57	-401.20	1082.55	-432.06	1262.97	-280.84	791.02	0	621.51
18.00	884.88	609.37	408.42	1536.37	-416.75	1097.41	-448.81	1280.31	-291.73	804.43	0	632.06
18.50	908.21	626.06	432.23	1569.43	-441.05	1121.02	-474.98	1307.86	-308.74	825.64	0	648.72
19.00	923.27	636.84	447.78	1590.67	-456.92	1136.20	-492.07	1325.56	-319.84	839.34	0	659.48
19.50	946.61	653.53	471.60	1623.74	-481.23	1159.81	-518.24	1353.12	-336.86	860.56	0	676.15
20.00	961.95	664.51	487.43	1645.38	-497.38	1175.27	-535.63	1371.15	-348.16	874.50	0	687.11
20.50	985.30	681.21	511.24	1678.47	-521.67	1198.91	-561.80	1398.73	-365.17	895.73	0	703.79
21.00	1001.01	692.45	527.32	1700.70	-538.08	1214.79	-579.47	1417.25	-376.66	910.01	0	715.01
21.50	1024.53	709.26	551.11	1734.14	-562.36	1238.67	-605.62	1445.12	-393.65	931.39	0	731.81
22.00	1040.56	720.73	567.42	1756.89	-579.00	1254.92	-623.54	1464.07	-405.30	945.97	0	743.26
22.50	1064.06	737.53	591.19	1790.30	-603.25	1278.79	-649.66	1491.92	-422.28	967.33	0	760.04
23.00	1080.27	749.12	607.70	1813.28	-620.10	1295.20	-667.80	1511.07	-434.07	982.06	0	771.62
23.50	1103.60	765.80	631.44	1846.38	-644.33	1318.84	-693.89	1538.65	-451.03	1003.27	0	788.29
24.00	1119.82	777.41	648.15	1869.28	-661.37	1335.20	-712.25	1557.73	-462.96	1018.02	0	799.87
24.50	1143.04	794.02	671.85	1902.17	-685.56	1358.70	-738.29	1585.14	-479.89	1039.13	0	816.46
25.00	1159.44	805.76	688.73	1925.32	-702.78	1375.23	-756.84	1604.44	-491.95	1054.04	0	828.17
25.50	1182.62	822.34	712.39	1958.16	-726.93	1398.69	-782.85	1631.80	-508.85	1075.11	0	844.73
26.00	1199.18	834.19	729.44	1981.54	-744.32	1415.39	-801.58	1651.29	-521.03	1090.17	0	856.56

Résultats du sondage SP 02

Compté à partir de l'excavation de 3.70 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl*(bar)	Pl*(bar)	Ple*(bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40:	11.80]	47.547	47.379	47.4855	1.80	85.4739	966.1970	3.77	169.62
10.50	1.20	1.13	[9.90:	12.30]	47.550	47.332	47.4453	1.80	85.4015	965.3788	3.77	200.81
11.00	1.20	1.13	[10.40:	12.80]	47.512	47.284	47.3980	1.80	85.3164	964.4166	3.77	217.83
11.50	1.20	1.13	[10.90:	13.30]	47.465	44.627	47.1874	1.80	84.9373	960.1310	3.77	249.94
12.00	1.20	1.13	[11.40:	13.80]	47.417	40.229	46.1430	1.80	83.0574	938.8808	3.77	268.06
12.50	1.20	1.13	[11.90:	14.30]	47.370	41.052	44.5186	1.80	80.1335	905.8294	3.77	300.79
13.00	1.20	1.13	[12.40:	14.80]	47.322	45.354	43.6555	1.80	78.5799	888.2672	3.77	319.83
13.50	1.20	1.13	[12.90:	15.30]	47.275	47.077	43.5374	1.80	78.3673	885.8637	3.77	352.99
14.00	1.20	1.13	[13.40:	15.80]	43.747	47.079	43.7913	1.80	78.8244	891.0310	3.77	372.82
14.50	1.20	1.13	[13.90:	16.30]	39.350	47.022	44.9401	1.80	80.8922	914.4049	3.77	406.26
15.00	1.20	1.13	[14.40:	16.80]	41.912	46.924	46.4063	1.80	83.5314	944.2389	3.77	426.78
15.50	1.20	1.13	[14.90:	17.30]	46.215	46.887	46.9959	1.80	84.5927	956.2353	3.77	460.41
16.00	1.20	1.13	[15.40:	17.80]	47.077	46.889	46.9747	1.80	84.5544	955.8029	3.77	481.53
16.50	1.20	1.13	[15.90:	18.30]	47.080	46.862	46.9336	1.80	84.4805	954.9679	3.77	515.29
17.00	1.20	1.13	[16.40:	18.80]	47.002	46.814	46.8897	1.80	84.4014	954.0734	3.77	536.94
17.50	1.20	1.13	[16.90:	19.30]	46.905	46.767	46.8557	1.80	84.3403	953.3825	3.77	570.76
18.00	1.20	1.13	[17.40:	19.80]	46.887	46.719	46.8255	1.80	84.2859	952.7678	3.77	592.89
18.50	1.20	1.13	[17.90:	20.30]	46.890	46.672	46.7853	1.80	84.2135	951.9497	3.77	626.74
19.00	1.20	1.13	[18.40:	20.80]	46.852	46.624	46.7380	1.80	84.1284	950.9874	3.77	649.29
19.50	1.20	1.13	[18.90:	21.30]	46.805	46.577	46.6905	1.80	84.0429	950.0209	3.77	683.16
20.00	1.20	1.13	[19.40:	21.80]	46.757	46.529	46.6430	1.80	83.9574	949.0544	3.77	706.08
20.50	1.20	1.13	[19.90:	22.30]	46.710	46.482	46.5955	1.80	83.8719	948.0880	3.77	739.94
21.00	1.20	1.13	[20.40:	22.80]	46.662	46.434	46.5480	1.80	83.7864	947.1215	3.77	763.21
21.50	1.20	1.13	[20.90:	23.30]	46.615	46.387	46.5005	1.80	83.7009	946.1550	3.77	797.04
22.00	1.20	1.13	[21.40:	23.80]	46.567	46.339	46.4530	1.80	83.6154	945.1885	3.77	820.62
22.50	1.20	1.13	[21.90:	24.30]	46.520	46.292	46.4055	1.80	83.5299	944.2220	3.77	854.42
23.00	1.20	1.13	[22.40:	24.80]	46.472	46.244	46.3580	1.80	83.4444	943.2555	3.77	878.28
23.50	1.20	1.13	[22.90:	25.30]	46.425	46.227	46.3124	1.80	83.3623	942.3272	3.77	912.04
24.00	1.20	1.13	[23.40:	25.80]	46.377	46.229	46.2763	1.80	83.2974	941.5938	3.77	936.16
24.50	1.20	1.13	[23.90:	26.30]	46.330	46.202	46.2488	1.80	83.2479	941.0343	3.77	969.87
25.00	1.20	1.13	[24.40:	26.80]	46.282	46.154	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	994.24
25.50	1.20	1.13	[24.90:	27.30]	46.235	46.077	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	1027.89
26.00	1.20	1.13	[25.40:	27.80]	46.227	45.979	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	1052.48
26.50	1.20	1.13	[25.90:	28.30]	46.230	45.942	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	1086.08
27.00	1.20	1.13	[26.40:	28.80]	46.192	45.944	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	1110.88

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax(t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	601.83	406.88	118.73	1135.82	-121.16	811.30	-130.48	946.51	-84.81	547.12	0	429.88
10.50	623.26	422.20	140.57	1166.19	-143.44	832.99	-154.47	971.83	-100.41	566.60	0	445.18
11.00	634.69	430.39	152.48	1182.25	-155.59	844.46	-167.56	985.21	-108.92	576.99	0	453.35
11.50	655.03	445.02	174.96	1210.08	-178.53	864.34	-192.26	1008.40	-124.97	595.48	0	467.88
12.00	657.08	446.99	187.64	1206.94	-191.47	862.10	-206.20	1005.78	-134.03	597.35	0	469.34
12.50	663.47	452.34	210.55	1206.62	-214.85	861.87	-231.38	1005.52	-150.40	603.15	0	473.91
13.00	668.01	456.00	223.88	1208.10	-228.45	862.93	-246.02	1006.75	-159.91	607.29	0	477.15
13.50	690.02	471.78	247.09	1238.85	-252.13	884.89	-271.53	1032.38	-176.49	627.29	0	492.87
14.00	706.49	483.42	260.97	1263.85	-266.30	902.75	-286.78	1053.21	-186.41	642.26	0	504.63
14.50	741.59	507.93	284.38	1320.67	-290.19	943.33	-312.51	1100.56	-203.13	674.17	0	529.70
15.00	770.87	528.14	298.75	1371.02	-304.84	979.30	-328.29	1142.52	-213.39	700.79	0	550.62
15.50	800.41	548.95	322.29	1416.65	-328.87	1011.89	-354.16	1180.54	-230.21	727.64	0	571.72
16.00	814.98	559.37	337.07	1437.34	-343.95	1026.67	-370.41	1197.78	-240.77	740.89	0	582.13
16.50	838.19	575.97	360.70	1470.26	-368.06	1050.18	-396.38	1225.21	-257.64	761.99	0	598.70
17.00	852.89	586.49	375.86	1491.01	-383.53	1065.01	-413.03	1242.51	-268.47	775.36	0	609.21
17.50	876.23	603.18	399.53	1524.15	-407.69	1088.68	-439.05	1270.12	-285.38	796.57	0	625.88
18.00	891.40	614.03	415.02	1545.65	-423.49	1104.04	-456.07	1288.04	-296.44	810.37	0	636.72
18.50	914.70	630.69	438.72	1578.69	-447.67	1127.64	-482.11	1315.58	-313.37	831.54	0	653.35
19.00	930.00	641.64	454.50	1600.28	-463.78	1143.05	-499.45	1333.56	-324.64	845.45	0	664.28
19.50	953.22	658.25	478.21	1633.18	-487.97	1166.56	-525.51	1360.98	-341.58	866.56	0	680.87
20.00	968.78	669.39	494.26	1655.14	-504.34	1182.24	-543.14	1379.28	-353.04	880.71	0	691.99
20.50	992.00	686.00	517.96	1688.03	-528.53	1205.73	-569.18	1406.69	-369.97	901.82	0	708.57
21.00	1007.81	697.31	534.24	1710.33	-545.15	1221.66	-587.08	1425.27	-381.60	916.19	0	719.86
21.50	1031.00	713.90	557.93	1743.19	-569.31	1245.14	-613.11	1452.66	-398.52	937.28	0	736.43
22.00	1047.03	725.37	574.43	1765.81	-586.16	1261.29	-631.25	1471.51	-410.31	951.84	0	747.88
22.50	1070.20	741.95	598.09	1798.64	-610.30	1284.74	-657.24	1498.86	-427.21	972.91	0	764.43
23.00	1086.43	753.56	614.80	1821.54	-627.34	1301.10	-675.60	1517.95	-439.14	987.66	0	776.02
23.50	1109.59	770.13	638.43	1854.36	-651.45	1324.55	-701.57	1545.30	-456.02	1008.72	0	792.56
24.00	1126.11	781.95	655.31	1877.76	-668.69	1341.26	-720.13	1564.80	-468.08	1023.74	0	804.37
24.50	1149.43	798.61	678.91	1910.90	-692.76	1364.93	-746.05	1592.42	-484.93	1044.93	0	821.02
25.00	1166.21	810.62	695.97	1934.73	-710.17	1381.95	-764.80	1612.27	-497.12	1060.19	0	833.01
25.50	1189.77	827.44	719.52	1968.38	-734.21	1405.99	-790.69	1640.32	-513.95	1081.61	0	849.84
26.00	1206.98	839.74	736.74	1992.97	-751.77	1423.55	-809.60	1660.81	-526.24	1097.26	0	862.13
26.50	1230.50	856.54	760.26	2026.57	-775.77	1447.55	-835.45	1688.81	-543.04	1118.64	0	878.93
27.00	1247.86	868.94	777.61	2051.37	-793.48	1465.26	-854.52	1709.47	-555.44	1134.42	0	891.33

Résultats du sondage SP 03

Compté à partir de l'excavation de 4.10 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl*(bar)	Pl*(bar)	Ple*(bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40:	11.80]	31.587	47.379	41.5905	1.80	74.8629	846.2502	3.77	83.20
10.50	1.20	1.13	[9.90:	12.30]	35.140	47.332	44.5055	1.80	80.1099	905.5623	3.77	110.12
11.00	1.20	1.13	[10.40:	12.80]	40.492	47.284	46.5205	1.80	83.7369	946.5619	3.77	124.72
11.50	1.20	1.13	[10.90:	13.30]	46.295	47.237	47.3261	1.80	85.1870	962.9541	3.77	157.92
12.00	1.20	1.13	[11.40:	13.80]	47.417	47.189	47.3030	1.80	85.1454	962.4836	3.77	169.37
12.50	1.20	1.13	[11.90:	14.30]	47.370	47.142	47.2555	1.80	85.0599	961.5171	3.77	203.54
13.00	1.20	1.13	[12.40:	14.80]	47.322	47.094	47.2080	1.80	84.9744	960.5506	3.77	216.42
13.50	1.20	1.13	[12.90:	15.30]	47.275	47.047	47.1605	1.80	84.8889	959.5841	3.77	251.25
14.00	1.20	1.13	[13.40:	15.80]	47.227	46.999	47.1130	1.80	84.8034	958.6176	3.77	265.36
14.50	1.20	1.13	[13.90:	16.30]	47.180	46.952	47.0655	1.80	84.7179	957.6511	3.77	300.64
15.00	1.20	1.13	[14.40:	16.80]	47.132	46.904	47.0180	1.80	84.6324	956.6846	3.77	315.82
15.50	1.20	1.13	[14.90:	17.30]	47.085	46.887	46.9724	1.80	84.5503	955.7563	3.77	351.39
16.00	1.20	1.13	[15.40:	17.80]	47.037	46.889	46.9363	1.80	84.4854	955.0230	3.77	367.51
16.50	1.20	1.13	[15.90:	18.30]	46.990	44.222	46.7438	1.80	84.1389	951.1061	3.77	403.26
17.00	1.20	1.13	[16.40:	18.80]	46.942	39.774	45.7088	1.80	82.2759	930.0468	3.77	420.20
17.50	1.20	1.13	[16.90:	19.30]	46.895	40.607	44.0872	1.80	79.3569	897.0504	3.77	456.07
18.00	1.20	1.13	[17.40:	19.80]	46.887	44.959	43.2322	1.80	77.8179	879.6535	3.77	473.75
18.50	1.20	1.13	[17.90:	20.30]	46.890	46.672	43.1186	1.80	77.6135	877.3433	3.77	509.66
19.00	1.20	1.13	[18.40:	20.80]	43.332	46.624	43.3647	1.80	78.0564	882.3495	3.77	528.00
19.50	1.20	1.13	[18.90:	21.30]	38.885	46.577	44.5088	1.80	80.1159	905.6301	3.77	563.93
20.00	1.20	1.13	[19.40:	21.80]	41.477	46.529	45.9830	1.80	82.7694	935.6253	3.77	582.85
20.50	1.20	1.13	[19.90:	22.30]	45.830	46.482	46.5772	1.80	83.8389	947.7149	3.77	618.77
21.00	1.20	1.13	[20.40:	22.80]	46.662	46.434	46.5480	1.80	83.7864	947.1215	3.77	638.22
21.50	1.20	1.13	[20.90:	23.30]	46.615	46.387	46.5005	1.80	83.7009	946.1550	3.77	674.10
22.00	1.20	1.13	[21.40:	23.80]	46.567	46.339	46.4530	1.80	83.6154	945.1885	3.77	694.04
22.50	1.20	1.13	[21.90:	24.30]	46.520	46.292	46.4055	1.80	83.5299	944.2220	3.77	729.86
23.00	1.20	1.13	[22.40:	24.80]	46.472	46.244	46.3580	1.80	83.4444	943.2555	3.77	750.25
23.50	1.20	1.13	[22.90:	25.30]	46.425	46.227	46.3124	1.80	83.3623	942.3272	3.77	786.00
24.00	1.20	1.13	[23.40:	25.80]	46.377	46.229	46.2763	1.80	83.2974	941.5938	3.77	806.80
24.50	1.20	1.13	[23.90:	26.30]	46.330	46.172	46.2763	1.80	83.2974	941.5938	3.77	842.48
25.00	1.20	1.13	[24.40:	26.80]	46.282	46.074	46.2763	1.80	83.2974	941.5938	3.77	863.65
25.50	1.20	1.13	[24.90:	27.30]	46.235	46.007	46.2763	1.80	83.2974	941.5938	3.77	899.24
26.00	1.20	1.13	[25.40:	27.80]	46.227	45.959	46.2763	1.80	83.2974	941.5938	3.77	920.76

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax(t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	481.36	323.68	58.24	929.45	-59.43	663.89	-64.00	774.54	-41.60	437.60	0	343.83
10.50	529.87	356.92	77.09	1015.69	-78.66	725.49	-84.71	846.41	-55.06	481.70	0	378.48
11.00	560.58	377.88	87.30	1071.28	-89.08	765.20	-95.94	892.73	-62.36	509.62	0	400.42
11.50	592.02	399.95	110.55	1120.88	-112.80	800.63	-121.48	934.06	-78.96	538.20	0	422.87
12.00	599.80	405.51	118.56	1131.85	-120.98	808.46	-130.28	943.21	-84.68	545.27	0	428.43
12.50	623.23	422.27	142.48	1165.05	-145.38	832.18	-156.57	970.88	-101.77	566.58	0	445.17
13.00	631.77	428.39	151.49	1176.97	-154.59	840.69	-166.48	980.81	-108.21	574.34	0	451.26
13.50	655.67	445.49	175.87	1210.83	-179.46	864.88	-193.27	1009.03	-125.62	596.06	0	468.33
14.00	665.06	452.22	185.75	1223.98	-189.55	874.27	-204.13	1019.98	-132.68	604.60	0	475.05
14.50	689.27	469.54	210.45	1258.29	-214.74	898.78	-231.26	1048.57	-150.32	626.61	0	492.34
15.00	699.42	476.81	221.07	1272.50	-225.59	908.93	-242.94	1060.42	-157.91	635.83	0	499.58
15.50	723.85	494.28	245.97	1307.14	-250.99	933.67	-270.30	1089.29	-175.69	658.04	0	517.04
16.00	734.77	502.09	257.25	1322.53	-262.50	944.66	-282.70	1102.11	-183.75	667.97	0	524.83
16.50	757.84	518.67	282.28	1354.37	-288.04	967.40	-310.20	1128.64	-201.63	688.94	0	541.31
17.00	759.17	520.12	294.14	1350.25	-300.15	964.46	-323.23	1125.21	-210.10	690.15	0	542.26
17.50	767.77	527.05	319.25	1353.12	-325.76	966.51	-350.82	1127.60	-228.03	697.98	0	548.41
18.00	771.45	530.09	331.62	1353.40	-338.39	966.71	-364.42	1127.83	-236.87	701.32	0	551.03
18.50	795.44	547.28	356.76	1387.01	-364.05	990.72	-392.05	1155.84	-254.83	723.12	0	568.17
19.00	810.77	558.11	369.60	1410.35	-377.14	1007.39	-406.15	1175.29	-264.00	737.07	0	579.12
19.50	847.56	583.84	394.75	1469.56	-402.81	1049.68	-433.79	1224.63	-281.96	770.51	0	605.40
20.00	875.81	603.30	408.00	1518.48	-416.32	1084.63	-448.35	1265.40	-291.43	796.19	0	625.58
20.50	906.99	625.29	433.14	1566.48	-441.98	1118.91	-475.97	1305.40	-309.38	824.54	0	647.85
21.00	920.32	634.82	446.76	1585.35	-455.87	1132.39	-490.94	1321.12	-319.11	836.65	0	657.37
21.50	944.95	652.43	471.87	1620.25	-481.50	1157.32	-518.54	1350.21	-337.05	859.04	0	674.96
22.00	958.42	662.08	485.83	1639.23	-495.74	1170.88	-533.88	1366.03	-347.02	871.29	0	684.59
22.50	983.02	679.67	510.90	1674.09	-521.33	1195.78	-561.43	1395.07	-364.93	893.65	0	702.15
23.00	996.80	689.54	525.18	1693.51	-535.89	1209.65	-577.12	1411.26	-375.13	906.18	0	712.00
23.50	1021.37	707.11	550.20	1728.33	-561.43	1234.52	-604.62	1440.28	-393.00	928.52	0	729.55
24.00	1035.56	717.26	564.76	1748.39	-576.28	1248.85	-620.61	1456.99	-403.40	941.41	0	739.68
24.50	1060.53	735.10	589.73	1784.07	-601.77	1274.34	-648.06	1486.73	-421.24	964.12	0	757.52
25.00	1075.35	745.69	604.55	1805.24	-616.89	1289.46	-664.34	1504.37	-431.82	977.59	0	768.11
25.50	1100.27	763.49	629.47	1840.84	-642.32	1314.88	-691.73	1534.03	-449.62	1000.24	0	785.91
26.00	1115.33	774.24	644.53	1862.35	-657.68	1330.25	-708.27	1551.96	-460.38	1013.93	0	796.66

Résultats du sondage SP 04

Compté à partir de l'excavation de 3.30 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl*(bar)	Pl*(bar)	Ple*(bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40:	11.80]	12.969	31.679	22.7591	1.10	25.0350	282.9955	3.77	46.96
10.50	1.20	1.13	[9.90:	12.30]	19.537	37.742	26.5581	1.10	29.2140	330.2346	3.77	57.96
11.00	1.20	1.13	[10.40:	12.80]	22.012	44.544	30.7163	1.20	36.8596	416.6609	3.77	68.13
11.50	1.20	1.13	[10.90:	13.30]	23.465	43.997	35.5084	1.20	42.6101	481.6646	3.77	84.67
12.00	1.20	1.13	[11.40:	13.80]	27.717	38.549	38.8338	1.20	46.6006	526.7732	3.77	90.80
12.50	1.20	1.13	[11.90:	14.30]	32.670	39.582	40.4122	1.20	48.4946	548.1830	3.77	115.13
13.00	1.20	1.13	[12.40:	14.80]	39.102	44.934	41.7705	1.20	50.1246	566.6085	3.77	134.10
13.50	1.20	1.13	[12.90:	15.30]	45.905	47.047	42.6320	1.20	51.1584	578.2940	3.77	166.43
14.00	1.20	1.13	[13.40:	15.80]	42.907	46.999	42.9730	1.80	77.3514	874.3802	3.77	169.71
14.50	1.20	1.13	[13.90:	16.30]	37.460	46.982	44.3899	1.80	79.9018	903.2097	3.77	200.64
15.00	1.20	1.13	[14.40:	16.80]	40.652	46.984	46.2213	1.80	83.1984	940.4747	3.77	217.04
15.50	1.20	1.13	[14.90:	17.30]	46.005	46.957	46.9813	1.80	84.5664	955.9386	3.77	254.33
16.00	1.20	1.13	[15.40:	17.80]	47.037	46.909	46.9772	1.80	84.5589	955.8538	3.77	266.00
16.50	1.20	1.13	[15.90:	18.30]	46.990	46.862	46.9505	1.80	84.5109	955.3112	3.77	303.53
17.00	1.20	1.13	[16.40:	18.80]	46.982	46.814	46.9205	1.80	84.4569	954.7008	3.77	316.28
17.50	1.20	1.13	[16.90:	19.30]	46.985	46.737	46.8784	1.80	84.3812	953.8445	3.77	353.96
18.00	1.20	1.13	[17.40:	19.80]	46.947	46.639	46.8197	1.80	84.2754	952.6491	3.77	367.68
18.50	1.20	1.13	[17.90:	20.30]	46.900	46.602	46.7540	1.80	84.1573	951.3138	3.77	405.44
19.00	1.20	1.13	[18.40:	20.80]	46.852	46.604	46.6972	1.80	84.0549	950.1566	3.77	420.02
19.50	1.20	1.13	[18.90:	21.30]	46.805	46.577	46.6488	1.80	83.9679	949.1731	3.77	457.79
20.00	1.20	1.13	[19.40:	21.80]	46.717	46.529	46.6047	1.80	83.8884	948.2745	3.77	473.15
20.50	1.20	1.13	[19.90:	22.30]	46.620	46.482	46.5707	1.80	83.8273	947.5835	3.77	510.90
21.00	1.20	1.13	[20.40:	22.80]	46.602	46.434	46.5405	1.80	83.7729	946.9689	3.77	526.96
21.50	1.20	1.13	[20.90:	23.30]	46.605	46.387	46.5003	1.80	83.7005	946.1507	3.77	564.66
22.00	1.20	1.13	[21.40:	23.80]	46.567	46.339	46.4530	1.80	83.6154	945.1885	3.77	581.36
22.50	1.20	1.13	[21.90:	24.30]	46.520	46.292	46.4055	1.80	83.5299	944.2220	3.77	618.99
23.00	1.20	1.13	[22.40:	24.80]	46.472	46.244	46.3580	1.80	83.4444	943.2555	3.77	636.28
23.50	1.20	1.13	[22.90:	25.30]	46.425	46.227	46.3124	1.80	83.3623	942.3272	3.77	673.81
24.00	1.20	1.13	[23.40:	25.80]	46.377	46.229	46.2763	1.80	83.2974	941.5938	3.77	691.64
24.50	1.20	1.13	[23.90:	26.30]	46.330	46.202	46.2488	1.80	83.2479	941.0343	3.77	729.07
25.00	1.20	1.13	[24.40:	26.80]	46.282	46.154	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	747.39
25.50	1.20	1.13	[24.90:	27.30]	46.235	46.077	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	784.72
26.00	1.20	1.13	[25.40:	27.80]	46.227	45.979	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	803.49
26.50	1.20	1.13	[25.90:	28.30]	46.230	45.942	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	840.71
27.00	1.20	1.13	[26.40:	28.80]	46.192	45.944	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	859.91

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax(t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	174.37	117.81	32.87	329.95	-33.54	235.68	-36.12	274.96	-23.48	158.52	0	124.55
10.50	205.69	139.06	40.57	388.20	-41.40	277.28	-44.59	323.50	-28.98	186.99	0	146.92
11.00	256.02	172.95	47.69	484.79	-48.67	346.28	-52.41	404.00	-34.07	232.75	0	182.87
11.50	300.10	202.89	59.27	566.33	-60.48	404.52	-65.13	471.94	-42.33	272.82	0	214.36
12.00	326.95	220.99	63.56	617.58	-64.86	441.13	-69.85	514.65	-45.40	297.23	0	233.54
12.50	354.68	240.29	80.59	663.31	-82.23	473.79	-88.56	552.76	-57.56	322.44	0	253.34
13.00	377.17	255.92	93.87	700.71	-95.79	500.51	-103.15	583.92	-67.05	342.89	0	269.41
13.50	405.65	275.98	116.50	744.72	-118.88	531.94	-128.02	620.60	-83.21	368.77	0	289.75
14.00	555.98	376.31	118.79	1044.09	-121.22	745.78	-130.54	870.07	-84.85	505.44	0	397.13
14.50	592.05	401.39	140.45	1103.85	-143.31	788.46	-154.34	919.87	-100.32	538.23	0	422.89
15.00	622.17	422.01	151.93	1157.52	-155.03	826.80	-166.96	964.60	-108.52	565.61	0	444.40
15.50	656.00	445.81	178.03	1210.27	-181.66	864.48	-195.64	1008.56	-127.17	596.36	0	468.57
16.00	664.12	451.62	186.20	1221.85	-190.00	872.75	-204.61	1018.21	-133.00	603.75	0	474.37
16.50	690.13	470.20	212.47	1258.84	-216.81	899.17	-233.49	1049.04	-151.77	627.39	0	492.95
17.00	698.75	476.38	221.40	1270.99	-225.92	907.85	-243.30	1059.15	-158.14	635.23	0	499.11
17.50	724.70	494.93	247.78	1307.81	-252.83	934.15	-272.28	1089.84	-176.98	658.82	0	517.64
18.00	733.70	501.39	257.38	1320.33	-262.63	943.10	-282.83	1100.28	-183.84	667.00	0	524.07
18.50	759.46	519.82	283.80	1356.75	-289.60	969.11	-311.87	1130.62	-202.72	690.42	0	542.47
19.00	769.09	526.73	294.01	1370.18	-300.01	978.70	-323.09	1141.81	-210.01	699.17	0	549.35
19.50	795.04	545.29	320.45	1406.96	-326.99	1004.97	-352.14	1172.47	-228.89	722.76	0	567.88
20.00	805.34	552.67	331.20	1421.42	-337.96	1015.30	-363.96	1184.52	-236.57	732.13	0	575.24
20.50	831.42	571.31	357.63	1458.48	-364.93	1041.77	-393.00	1215.40	-255.45	755.84	0	593.87
21.00	842.36	579.14	368.87	1473.93	-376.40	1052.81	-405.36	1228.28	-263.48	765.78	0	601.68
21.50	868.33	597.71	395.26	1510.81	-403.33	1079.15	-434.35	1259.01	-282.33	789.40	0	620.24
22.00	879.55	605.74	406.95	1526.55	-415.26	1090.39	-447.20	1272.13	-290.68	799.59	0	628.25
22.50	905.40	624.23	433.29	1563.21	-442.13	1116.58	-476.14	1302.67	-309.49	823.09	0	646.71
23.00	917.02	632.56	445.39	1579.53	-454.48	1128.24	-489.44	1316.28	-318.14	833.65	0	655.01
23.50	942.83	651.01	471.67	1616.14	-481.29	1154.38	-518.32	1346.78	-336.91	857.12	0	673.45
24.00	954.94	659.68	484.15	1633.23	-494.03	1166.59	-532.03	1361.02	-345.82	868.13	0	682.10
24.50	980.87	678.21	510.35	1670.11	-520.77	1192.93	-560.82	1391.76	-364.54	891.70	0	700.62
25.00	993.42	687.19	523.17	1687.88	-533.85	1205.63	-574.92	1406.57	-373.70	903.11	0	709.59
25.50	1019.55	705.86	549.30	1725.21	-560.52	1232.29	-603.63	1437.68	-392.36	926.86	0	728.25
26.00	1032.69	715.24	562.45	1743.99	-573.92	1245.70	-618.07	1453.32	-401.75	938.81	0	737.64
26.50	1058.75	733.85	588.50	1781.21	-600.51	1272.29	-646.70	1484.34	-420.36	962.50	0	756.25
27.00	1072.18	743.45	601.94	1800.40	-614.22	1286.00	-661.47	1500.33	-429.95	974.71	0	765.84

Résultats du sondage SP 05

Compté à partir de l'excavation de 3.95 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl*(bar)	Pl*(bar)	Ple*(bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40:	11.80]	5.643	35.119	16.4067	1.00	16.4067	185.4610	3.77	47.29
10.50	1.20	1.13	[9.90:	12.30]	5.916	41.242	23.2706	1.00	23.2706	263.0511	3.77	56.53
11.00	1.20	1.13	[10.40:	12.80]	11.964	45.544	30.5687	1.10	33.6255	380.1030	3.77	68.49
11.50	1.20	1.13	[10.90:	13.30]	19.457	47.267	37.0710	1.10	40.7781	460.9551	3.77	88.48
12.00	1.20	1.13	[11.40:	13.80]	28.037	47.269	41.9938	1.20	50.3926	569.6380	3.77	100.47
12.50	1.20	1.13	[11.90:	14.30]	36.890	47.212	45.0749	1.20	54.0899	611.4317	3.77	130.15
13.00	1.20	1.13	[12.40:	14.80]	42.102	47.114	46.5963	1.80	83.8734	948.1049	3.77	144.23
13.50	1.20	1.13	[12.90:	15.30]	46.405	47.077	47.1859	1.80	84.9347	960.1013	3.77	180.23
14.00	1.20	1.13	[13.40:	15.80]	47.267	47.079	47.1647	1.80	84.8964	959.6689	3.77	190.35
14.50	1.20	1.13	[13.90:	16.30]	47.270	47.022	47.1218	1.80	84.8192	958.7957	3.77	226.90
15.00	1.20	1.13	[14.40:	16.80]	47.192	46.924	47.0663	1.80	84.7194	957.6681	3.77	238.36
15.50	1.20	1.13	[14.90:	17.30]	47.095	46.887	47.0143	1.80	84.6257	956.6083	3.77	275.28
16.00	1.20	1.13	[15.40:	17.80]	47.077	46.889	46.9747	1.80	84.5544	955.8029	3.77	287.90
16.50	1.20	1.13	[15.90:	18.30]	47.080	46.862	46.9336	1.80	84.4805	954.9679	3.77	325.06
17.00	1.20	1.13	[16.40:	18.80]	47.002	46.814	46.8897	1.80	84.4014	954.0734	3.77	338.71
17.50	1.20	1.13	[16.90:	19.30]	46.905	46.767	46.8557	1.80	84.3403	953.3825	3.77	376.00
18.00	1.20	1.13	[17.40:	19.80]	46.887	46.719	46.8255	1.80	84.2859	952.7678	3.77	390.57
18.50	1.20	1.13	[17.90:	20.30]	46.890	46.672	46.7853	1.80	84.2135	951.9497	3.77	427.93
19.00	1.20	1.13	[18.40:	20.80]	46.852	46.624	46.7380	1.80	84.1284	950.9874	3.77	443.32
19.50	1.20	1.13	[18.90:	21.30]	46.805	46.577	46.6905	1.80	84.0429	950.0209	3.77	480.70
20.00	1.20	1.13	[19.40:	21.80]	46.757	46.529	46.6430	1.80	83.9574	949.0544	3.77	496.83
20.50	1.20	1.13	[19.90:	22.30]	46.710	46.482	46.5955	1.80	83.8719	948.0880	3.77	534.18
21.00	1.20	1.13	[20.40:	22.80]	46.662	46.434	46.5480	1.80	83.7864	947.1215	3.77	550.97
21.50	1.20	1.13	[20.90:	23.30]	46.615	46.387	46.5005	1.80	83.7009	946.1550	3.77	588.28
22.00	1.20	1.13	[21.40:	23.80]	46.567	46.339	46.4530	1.80	83.6154	945.1885	3.77	605.68
22.50	1.20	1.13	[21.90:	24.30]	46.520	46.322	46.4074	1.80	83.5333	944.2601	3.77	642.92
23.00	1.20	1.13	[22.40:	24.80]	46.472	46.324	46.3713	1.80	83.4684	943.5268	3.77	660.87
23.50	1.20	1.13	[22.90:	25.30]	46.425	46.297	46.3438	1.80	83.4189	942.9672	3.77	698.02
24.00	1.20	1.13	[23.40:	25.80]	46.377	46.249	46.3172	1.80	83.3709	942.4247	3.77	716.49
24.50	1.20	1.13	[23.90:	26.30]	46.330	46.202	46.2905	1.80	83.3229	941.8821	3.77	753.55
25.00	1.20	1.13	[24.40:	26.80]	46.322	46.154	46.2605	1.80	83.2689	941.2716	3.77	772.48
25.50	1.20	1.13	[24.90:	27.30]	46.325	46.107	46.2605	1.80	83.2689	941.2716	3.77	809.44
26.00	1.20	1.13	[25.40:	27.80]	46.287	46.059	46.2605	1.80	83.2689	941.2716	3.77	828.80
26.50	1.20	1.13	[25.90:	28.30]	46.240	46.012	46.2605	1.80	83.2689	941.2716	3.77	865.65
27.00	1.20	1.13	[26.40:	28.80]	46.192	45.964	46.2605	1.80	83.2689	941.2716	3.77	885.42

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax(t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	125.83	85.46	33.10	232.75	-33.78	166.25	-36.37	193.96	-23.64	114.39	0	89.88
10.50	171.09	115.95	39.57	319.58	-40.38	228.27	-43.48	266.31	-28.26	155.54	0	122.21
11.00	237.99	160.94	47.94	448.59	-48.92	320.42	-52.68	373.82	-34.24	216.36	0	169.99
11.50	292.42	197.89	61.94	549.44	-63.20	392.46	-68.06	457.86	-44.24	265.83	0	208.87
12.00	355.15	240.11	70.33	670.11	-71.76	478.65	-77.29	558.42	-50.24	322.86	0	253.68
12.50	396.82	268.89	91.10	741.58	-92.96	529.70	-100.12	617.98	-65.07	360.75	0	283.44
13.00	575.01	388.15	100.96	1092.33	-103.02	780.24	-110.95	910.28	-72.12	522.74	0	410.72
13.50	606.21	410.15	126.16	1140.33	-128.73	814.52	-138.64	950.27	-90.11	551.10	0	433.01
14.00	613.08	415.06	133.25	1150.02	-135.96	821.44	-146.42	958.35	-95.18	557.35	0	437.91
14.50	638.23	433.05	158.83	1185.70	-162.07	846.93	-174.54	988.08	-113.45	580.21	0	455.88
15.00	645.69	438.40	166.85	1196.03	-170.26	854.31	-183.35	996.69	-119.18	586.99	0	461.20
15.50	671.00	456.51	192.69	1231.89	-196.63	879.92	-211.75	1026.57	-137.64	610.00	0	479.28
16.00	679.43	462.55	201.53	1243.71	-205.65	888.36	-221.47	1036.42	-143.95	617.67	0	485.31
16.50	705.02	480.85	227.54	1280.02	-232.18	914.30	-250.04	1066.69	-162.53	640.93	0	503.59
17.00	714.14	487.38	237.10	1292.79	-241.94	923.42	-260.55	1077.32	-169.36	649.21	0	510.10
17.50	739.89	505.79	263.20	1329.38	-268.57	949.56	-289.23	1107.82	-188.00	672.63	0	528.49
18.00	749.79	512.88	273.40	1343.34	-278.98	959.53	-300.44	1119.45	-195.29	681.62	0	535.56
18.50	775.53	531.28	299.55	1379.88	-305.66	985.63	-329.18	1149.90	-213.97	705.02	0	553.95
19.00	785.82	538.66	310.33	1394.31	-316.66	995.94	-341.02	1161.93	-221.66	714.38	0	561.30
19.50	811.50	557.02	336.49	1430.72	-343.35	1021.94	-369.77	1192.26	-240.35	737.72	0	579.64
20.00	822.31	564.76	347.78	1445.88	-354.88	1032.77	-382.17	1204.90	-248.41	747.55	0	587.36
20.50	847.97	583.12	373.92	1482.26	-381.55	1058.76	-410.91	1235.22	-267.09	770.88	0	605.69
21.00	859.24	591.19	385.68	1498.10	-393.55	1070.07	-423.83	1248.41	-275.49	781.13	0	613.74
21.50	884.87	609.52	411.79	1534.43	-420.20	1096.02	-452.52	1278.69	-294.14	804.43	0	632.05
22.00	896.57	617.90	423.98	1550.87	-432.63	1107.76	-465.91	1292.39	-302.84	815.06	0	640.41
22.50	922.17	636.21	450.04	1587.18	-459.23	1133.70	-494.55	1322.65	-321.46	838.34	0	658.69
23.00	934.38	644.95	462.61	1604.40	-472.05	1146.00	-508.36	1337.00	-330.44	849.43	0	667.41
23.50	960.10	663.33	488.62	1640.99	-498.59	1172.14	-536.94	1367.49	-349.01	872.82	0	685.79
24.00	972.76	672.39	501.54	1658.92	-511.78	1184.94	-551.15	1382.43	-358.25	884.32	0	694.83
24.50	998.42	690.73	527.48	1695.43	-538.25	1211.02	-579.65	1412.86	-376.77	907.66	0	713.16
25.00	1011.37	700.00	540.74	1713.75	-551.77	1224.11	-594.22	1428.13	-386.24	919.43	0	722.41
25.50	1037.24	718.48	566.61	1750.71	-578.17	1250.51	-622.64	1458.92	-404.72	942.95	0	740.89
26.00	1050.80	728.16	580.16	1770.07	-592.00	1264.34	-637.54	1475.06	-414.40	955.27	0	750.57
26.50	1076.59	746.58	605.96	1806.93	-618.32	1290.66	-665.89	1505.77	-432.83	978.72	0	769.00
27.00	1090.43	756.47	619.79	1826.69	-632.44	1304.78	-681.09	1522.24	-442.71	991.30	0	778.88

Résultats du sondage SP 06

Compté à partir de l'excavation de 3.60 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl*(bar)	Pl*(bar)	Ple*(bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40:	11.80]	5.339	7.267	7.2658	1.10	7.9924	90.3463	3.77	39.54
10.50	1.20	1.13	[9.90:	12.30]	5.682	8.509	7.6576	1.10	8.4234	95.2182	3.77	45.04
11.00	1.20	1.13	[10.40:	12.80]	7.152	11.406	8.4188	1.10	9.2606	104.6821	3.77	50.09
11.50	1.20	1.13	[10.90:	13.30]	8.905	15.207	9.4807	1.10	10.4288	117.8869	3.77	56.36
12.00	1.20	1.13	[11.40:	13.80]	8.261	19.609	11.2693	1.20	13.5232	152.8663	3.77	59.58
12.50	1.20	1.13	[11.90:	14.30]	7.019	22.872	14.1503	1.20	16.9803	191.9456	3.77	66.12
13.00	1.20	1.13	[12.40:	14.80]	9.088	25.374	17.5671	1.20	21.0805	238.2940	3.77	71.91
13.50	1.20	1.13	[12.90:	15.30]	11.986	27.847	20.9170	1.20	25.1004	283.7346	3.77	84.01
14.00	1.20	1.13	[13.40:	15.80]	16.087	30.299	24.0747	1.20	28.8896	326.5680	3.77	94.97
14.50	1.20	1.13	[13.90:	16.30]	20.490	33.052	26.8511	1.20	32.2214	364.2301	3.77	113.24
15.00	1.20	1.13	[14.40:	16.80]	23.372	36.004	29.4438	1.20	35.3326	399.3997	3.77	118.96
15.50	1.20	1.13	[14.90:	17.30]	25.875	40.067	32.1918	1.20	38.6301	436.6747	3.77	137.43
16.00	1.20	1.13	[15.40:	17.80]	28.337	44.869	35.3913	1.20	42.4696	480.0764	3.77	143.73
16.50	1.20	1.13	[15.90:	18.30]	30.790	46.792	38.9003	1.20	46.6804	527.6747	3.77	166.53
17.00	1.20	1.13	[16.40:	18.80]	33.642	46.794	41.9455	1.20	50.3346	568.9823	3.77	180.12
17.50	1.20	1.13	[16.90:	19.30]	36.595	46.767	44.3763	1.20	53.2516	601.9561	3.77	213.70
18.00	1.20	1.13	[17.40:	19.80]	41.027	46.719	46.0597	1.80	82.9074	937.1852	3.77	228.72
18.50	1.20	1.13	[17.90:	20.30]	45.830	46.672	46.7403	1.80	84.1325	951.0341	3.77	268.87
19.00	1.20	1.13	[18.40:	20.80]	46.792	46.624	46.7305	1.80	84.1149	950.8348	3.77	278.54
19.50	1.20	1.13	[18.90:	21.30]	46.795	46.577	46.6903	1.80	84.0425	950.0167	3.77	318.72
20.00	1.20	1.13	[19.40:	21.80]	46.757	46.529	46.6430	1.80	83.9574	949.0544	3.77	329.41
20.50	1.20	1.13	[19.90:	22.30]	46.710	46.482	46.5955	1.80	83.8719	948.0880	3.77	369.56
21.00	1.20	1.13	[20.40:	22.80]	46.662	46.434	46.5480	1.80	83.7864	947.1215	3.77	381.18
21.50	1.20	1.13	[20.90:	23.30]	46.615	46.387	46.5005	1.80	83.7009	946.1550	3.77	421.26
22.00	1.20	1.13	[21.40:	23.80]	46.567	46.339	46.4530	1.80	83.6154	945.1885	3.77	433.72
22.50	1.20	1.13	[21.90:	24.30]	46.520	46.292	46.4055	1.80	83.5299	944.2220	3.77	473.70
23.00	1.20	1.13	[22.40:	24.80]	46.472	46.244	46.3580	1.80	83.4444	943.2555	3.77	486.94
23.50	1.20	1.13	[22.90:	25.30]	46.425	46.227	46.3124	1.80	83.3623	942.3272	3.77	526.80
24.00	1.20	1.13	[23.40:	25.80]	46.377	46.229	46.2763	1.80	83.2974	941.5938	3.77	540.74
24.50	1.20	1.13	[23.90:	26.30]	46.330	46.202	46.2488	1.80	83.2479	941.0343	3.77	580.48
25.00	1.20	1.13	[24.40:	26.80]	46.282	46.154	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	595.06
25.50	1.20	1.13	[24.90:	27.30]	46.235	46.077	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	634.66
26.00	1.20	1.13	[25.40:	27.80]	46.227	45.979	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	649.85
26.50	1.20	1.13	[25.90:	28.30]	46.230	45.942	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	689.30
27.00	1.20	1.13	[26.40:	28.80]	46.192	45.944	46.2222	1.80	83.1999	940.4917	3.77	705.04

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax(t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	72.85	49.89	27.68	129.89	-28.24	92.78	-30.42	108.24	-19.77	66.23	0	52.04
10.50	79.14	54.26	31.53	140.26	-32.17	100.18	-34.65	116.88	-22.52	71.94	0	56.53
11.00	87.40	59.94	35.06	154.77	-35.78	110.55	-38.53	128.97	-25.04	79.46	0	62.43
11.50	98.39	67.48	39.45	174.25	-40.26	124.46	-43.35	145.21	-28.18	89.45	0	70.28
12.00	118.14	80.75	41.71	212.45	-42.56	151.75	-45.83	177.04	-29.79	107.40	0	84.39
12.50	142.26	97.04	46.29	258.07	-47.23	184.34	-50.86	215.06	-33.05	129.33	0	101.61
13.00	169.49	115.39	50.34	310.21	-51.37	221.58	-55.32	258.51	-35.96	154.08	0	121.06
13.50	200.68	136.59	58.81	367.75	-60.01	262.68	-64.63	306.46	-42.01	182.43	0	143.34
14.00	229.76	156.34	66.48	421.53	-67.83	301.10	-73.05	351.28	-47.48	208.87	0	164.11
14.50	261.39	178.03	79.27	477.47	-80.89	341.05	-87.11	397.90	-56.62	237.62	0	186.70
15.00	282.97	192.62	83.27	518.36	-84.97	370.26	-91.51	431.97	-59.48	257.25	0	202.12
15.50	314.54	214.27	96.20	574.10	-98.16	410.07	-105.71	478.42	-68.71	285.94	0	224.67
16.00	340.65	231.89	100.61	623.81	-102.66	445.58	-110.56	519.84	-71.87	309.68	0	243.32
16.50	380.41	259.16	116.57	694.20	-118.95	495.86	-128.10	578.50	-83.26	345.83	0	271.72
17.00	410.58	279.72	126.09	749.11	-128.66	535.08	-138.56	624.25	-90.05	373.25	0	293.27
17.50	450.57	307.50	149.59	815.66	-152.64	582.61	-164.39	679.71	-106.85	409.61	0	321.83
18.00	628.69	426.75	160.10	1165.90	-163.37	832.79	-175.94	971.58	-114.36	571.54	0	449.07
18.50	663.73	451.45	188.21	1219.90	-192.05	871.36	-206.82	1016.59	-134.43	603.39	0	474.09
19.00	670.40	456.22	194.98	1229.38	-198.96	878.13	-214.26	1024.48	-139.27	609.45	0	478.85
19.50	698.11	476.03	223.10	1268.73	-227.65	906.24	-245.17	1057.28	-159.36	634.64	0	498.65
20.00	705.11	481.06	230.59	1278.47	-235.29	913.19	-253.39	1065.39	-164.71	641.01	0	503.65
20.50	732.73	500.81	258.69	1317.65	-263.97	941.18	-284.27	1098.04	-184.78	666.12	0	523.38
21.00	740.39	506.30	266.82	1328.30	-272.27	948.79	-293.21	1106.92	-190.59	673.08	0	528.85
21.50	767.96	526.01	294.88	1367.41	-300.90	976.72	-324.04	1139.51	-210.63	698.14	0	548.54
22.00	776.20	531.92	303.60	1378.91	-309.80	984.93	-333.63	1149.09	-216.86	705.64	0	554.43
22.50	803.70	551.59	331.59	1417.93	-338.36	1012.80	-364.39	1181.61	-236.85	730.64	0	574.07
23.00	812.48	557.89	340.86	1430.19	-347.81	1021.57	-374.57	1191.83	-243.47	738.62	0	580.35
23.50	839.93	577.51	368.76	1469.13	-376.29	1049.38	-405.23	1224.28	-263.40	763.57	0	599.95
24.00	849.32	584.24	378.52	1482.33	-386.24	1058.81	-415.95	1235.28	-270.37	772.11	0	606.65
24.50	876.85	603.92	406.34	1521.51	-414.63	1086.80	-446.52	1267.93	-290.24	797.14	0	626.32
25.00	886.79	611.03	416.55	1535.56	-425.05	1096.83	-457.74	1279.63	-297.53	806.17	0	633.42
25.50	914.51	630.83	444.26	1575.16	-453.33	1125.11	-488.20	1312.63	-317.33	831.37	0	653.22
26.00	925.14	638.42	454.89	1590.34	-464.18	1135.96	-499.88	1325.28	-324.92	841.04	0	660.81
26.50	952.76	658.15	482.51	1629.79	-492.36	1164.14	-530.23	1358.16	-344.65	866.14	0	680.54
27.00	963.77	666.02	493.53	1645.53	-503.60	1175.38	-542.34	1371.27	-352.52	876.16	0	688.41

Résultats du sondage SP 07

Compté à partir de l'excavation de 3.85 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl*(bar)	Pl*(bar)	Ple*(bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40;	11.80]	20.507	21.599	20.9380	1.20	25.1256	284.0198	3.77	69.94
10.50	1.20	1.13	[9.90;	12.30]	20.710	24.402	21.3363	1.20	25.6036	289.4231	3.77	77.56
11.00	1.20	1.13	[10.40;	12.80]	20.832	28.804	22.5497	1.20	27.0596	305.8817	3.77	84.13
11.50	1.20	1.13	[10.90;	13.30]	20.935	30.657	24.4990	1.20	29.3989	332.3246	3.77	91.81
12.00	1.20	1.13	[11.40;	13.80]	21.277	30.809	26.5097	1.20	31.8116	359.5983	3.77	98.46
12.50	1.20	1.13	[11.90;	14.30]	21.680	34.142	28.6682	1.20	34.4019	388.8785	3.77	113.52
13.00	1.20	1.13	[12.40;	14.80]	25.282	39.594	31.5238	1.80	56.7429	641.4217	3.77	132.39
13.50	1.20	1.13	[12.90;	15.30]	29.685	41.177	34.3730	1.80	61.8714	699.3943	3.77	158.99
14.00	1.20	1.13	[13.40;	15.80]	30.687	40.179	36.4880	1.80	65.6784	742.4286	3.77	167.92
14.50	1.20	1.13	[13.90;	16.30]	30.840	41.792	38.5088	1.80	69.3159	783.5469	3.77	198.89
15.00	1.20	1.13	[14.40;	16.80]	35.232	45.144	40.7705	1.80	73.3869	829.5655	3.77	215.20
15.50	1.20	1.13	[14.90;	17.30]	40.685	46.187	42.4724	1.80	76.4503	864.1939	3.77	252.52
16.00	1.20	1.13	[15.40;	17.80]	40.977	45.689	43.4288	1.80	78.1719	883.6552	3.77	264.11
16.50	1.20	1.13	[15.90;	18.30]	39.980	45.732	44.4963	1.80	80.0934	905.3758	3.77	301.67
17.00	1.20	1.13	[16.40;	18.80]	42.462	46.134	45.5505	1.80	81.9909	926.8251	3.77	314.35
17.50	1.20	1.13	[16.90;	19.30]	45.815	46.267	45.9913	1.80	82.7844	935.7949	3.77	352.06
18.00	1.20	1.13	[17.40;	19.80]	46.087	46.219	45.9880	1.80	82.7784	935.7270	3.77	365.71
18.50	1.20	1.13	[17.90;	20.30]	45.590	46.172	46.0624	1.80	82.9123	937.2404	3.77	403.49
19.00	1.20	1.13	[18.40;	20.80]	45.812	46.124	46.1705	1.80	83.1069	939.4404	3.77	418.01
19.50	1.20	1.13	[18.90;	21.30]	46.215	46.047	46.1868	1.80	83.1362	939.7710	3.77	455.81
20.00	1.20	1.13	[19.40;	21.80]	46.257	45.949	46.1297	1.80	83.0334	938.6096	3.77	471.11
20.50	1.20	1.13	[19.90;	22.30]	46.210	45.882	46.0622	1.80	82.9119	937.2361	3.77	508.89
21.00	1.20	1.13	[20.40;	22.80]	46.162	45.834	45.9938	1.80	82.7889	935.8457	3.77	524.89
21.50	1.20	1.13	[20.90;	23.30]	46.115	45.787	45.9255	1.80	82.6659	934.4553	3.77	562.62
22.00	1.20	1.13	[21.40;	23.80]	46.027	45.739	45.8605	1.80	82.5489	933.1328	3.77	579.26
22.50	1.20	1.13	[21.90;	24.30]	45.930	45.632	45.8020	1.80	82.4435	931.9416	3.77	616.92
23.00	1.20	1.13	[22.40;	24.80]	45.872	45.484	45.7313	1.80	82.3164	930.5046	3.77	634.15
23.50	1.20	1.13	[22.90;	25.30]	45.825	45.457	45.6476	1.80	82.1657	928.8005	3.77	671.72
24.00	1.20	1.13	[23.40;	25.80]	45.777	45.509	45.5813	1.80	82.0464	927.4525	3.77	689.49
24.50	1.20	1.13	[23.90;	26.30]	45.730	45.502	45.5322	1.80	81.9579	926.4521	3.77	726.96
25.00	1.20	1.13	[24.40;	26.80]	45.602	45.454	45.4913	1.80	81.8844	925.6213	3.77	745.23
25.50	1.20	1.13	[24.90;	27.30]	45.455	45.347	45.4913	1.80	81.8844	925.6213	3.77	782.59
26.00	1.20	1.13	[25.40;	27.80]	45.467	45.199	45.4913	1.80	81.8844	925.6213	3.77	801.31
26.50	1.20	1.13	[25.90;	28.30]	45.520	45.172	45.4913	1.80	81.8844	925.6213	3.77	838.56
27.00	1.20	1.13	[26.40;	28.80]	45.492	45.224	45.4913	1.80	81.8844	925.6213	3.77	857.71

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax(t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	190.97	129.65	48.96	353.96	-49.96	252.83	-53.80	294.97	-34.97	173.61	0	136.41
10.50	199.00	135.25	54.29	366.98	-55.40	262.13	-59.66	305.82	-38.78	180.91	0	142.14
11.00	211.83	144.03	58.89	390.01	-60.09	278.58	-64.71	325.01	-42.06	192.57	0	151.31
11.50	230.43	156.68	64.27	424.13	-65.58	302.95	-70.62	353.44	-45.90	209.48	0	164.59
12.00	248.72	169.10	68.92	458.06	-70.33	327.19	-75.74	381.72	-49.23	226.11	0	177.66
12.50	273.90	186.38	79.46	502.39	-81.08	358.85	-87.32	418.66	-56.76	249.00	0	195.64
13.00	413.38	280.00	92.67	773.81	-94.56	552.72	-101.84	644.84	-66.19	375.80	0	295.27
13.50	460.99	312.63	111.29	858.39	-113.57	613.13	-122.30	715.32	-79.50	419.08	0	329.28
14.00	488.76	331.44	117.55	910.35	-119.95	650.25	-129.17	758.63	-83.96	444.33	0	349.12
14.50	530.99	360.63	139.22	982.43	-142.06	701.74	-152.99	818.70	-99.44	482.72	0	379.28
15.00	565.42	384.12	150.64	1044.77	-153.72	746.26	-165.54	870.64	-107.60	514.02	0	403.87
15.50	608.86	414.33	176.77	1116.72	-180.37	797.65	-194.25	930.60	-126.26	553.51	0	434.90
16.00	626.70	426.60	184.87	1147.76	-188.65	819.83	-203.16	956.47	-132.05	569.73	0	447.64
16.50	663.86	452.63	211.17	1207.05	-215.48	862.18	-232.06	1005.88	-150.84	603.51	0	474.19
17.00	683.46	466.12	220.05	1241.18	-224.54	886.55	-241.81	1034.31	-157.18	621.33	0	488.18
17.50	714.34	487.96	246.44	1287.86	-251.47	919.90	-270.82	1073.22	-176.03	649.40	0	510.24
18.00	723.86	494.76	256.00	1301.44	-261.22	929.60	-281.32	1084.53	-182.85	658.05	0	517.04
18.50	751.07	514.16	282.45	1340.74	-288.21	957.67	-310.38	1117.28	-201.75	682.79	0	536.48
19.00	762.33	522.15	292.61	1357.45	-298.58	969.61	-321.55	1131.21	-209.00	693.02	0	544.52
19.50	788.95	541.16	319.07	1395.58	-325.58	996.84	-350.62	1162.99	-227.91	717.23	0	563.54
20.00	799.08	548.42	329.77	1409.72	-336.51	1006.94	-362.39	1174.76	-235.55	726.44	0	570.77
20.50	824.84	566.86	356.22	1446.12	-363.49	1032.95	-391.45	1205.10	-254.44	749.85	0	589.17
21.00	835.35	574.39	367.42	1460.74	-374.92	1043.38	-403.76	1217.28	-262.45	759.41	0	596.68
21.50	861.06	592.79	393.83	1497.07	-401.87	1069.34	-432.78	1247.56	-281.31	782.78	0	615.04
22.00	872.05	600.68	405.49	1512.40	-413.76	1080.28	-445.59	1260.33	-289.63	792.77	0	622.89
22.50	897.82	619.11	431.84	1548.86	-440.66	1106.33	-474.55	1290.72	-308.46	816.20	0	641.30
23.00	909.16	627.24	443.91	1564.66	-452.97	1117.61	-487.81	1303.88	-317.08	826.51	0	649.40
23.50	934.60	645.46	470.20	1600.52	-479.80	1143.23	-516.71	1333.77	-335.86	849.64	0	667.57
24.00	946.37	653.90	482.64	1616.94	-492.49	1154.96	-530.38	1347.45	-344.75	860.34	0	675.98
24.50	972.10	672.30	508.87	1653.41	-519.26	1181.01	-559.20	1377.84	-363.48	883.73	0	694.36
25.00	984.47	681.15	521.66	1670.85	-532.30	1193.46	-573.25	1392.37	-372.61	894.97	0	703.19
25.50	1010.62	699.83	547.81	1708.21	-558.99	1220.15	-601.99	1423.51	-391.29	918.75	0	721.87
26.00	1023.73	709.20	560.92	1726.93	-572.36	1233.52	-616.39	1439.11	-400.66	930.66	0	731.23
26.50	1049.80	727.82	586.99	1764.18	-598.97	1260.13	-645.05	1470.15	-419.28	954.37	0	749.86
27.00	1063.21	737.39	600.39	1783.33	-612.65	1273.81	-659.77	1486.11	-428.85	966.55	0	759.43

Résultats du sondage SP 08

Compté à partir de l'excavation de 3.55 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl*(bar)	Pl*(bar)	Ple*(bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40:	11.80]	3.125	2.445	2.2442	1.10	2.4686	27.9049	3.77	43.95
10.50	1.20	1.13	[9.90:	12.30]	2.313	2.524	2.2051	1.10	2.4256	27.4186	3.77	45.73
11.00	1.20	1.13	[10.40:	12.80]	2.068	2.446	2.2783	1.10	2.5061	28.3287	3.77	49.48
11.50	1.20	1.13	[10.90:	13.30]	1.966	2.219	2.3502	1.10	2.5853	29.2237	3.77	51.24
12.00	1.20	1.13	[11.40:	13.80]	2.195	1.891	2.3518	1.10	2.5870	29.2436	3.77	55.35
12.50	1.20	1.13	[11.90:	14.30]	2.508	1.663	2.2280	1.10	2.4508	27.7041	3.77	57.35
13.00	1.20	1.13	[12.40:	14.80]	2.508	1.500	2.0285	1.10	2.2314	25.2232	3.77	60.88
13.50	1.20	1.13	[12.90:	15.30]	2.431	2.589	1.8878	1.10	2.0766	23.4741	3.77	62.45
14.00	1.20	1.13	[13.40:	15.80]	2.153	4.511	2.1458	1.10	2.3603	26.6811	3.77	65.50
14.50	1.20	1.13	[13.90:	16.30]	1.826	7.352	2.9288	1.10	3.2216	36.4172	3.77	66.43
15.00	1.20	1.13	[14.40:	16.80]	1.630	10.804	4.4628	1.10	4.9090	55.4916	3.77	69.54
15.50	1.20	1.13	[14.90:	17.30]	1.468	14.347	6.7562	1.10	7.4318	84.0091	3.77	71.83
16.00	1.20	1.13	[15.40:	17.80]	2.973	17.949	9.6925	1.10	10.6618	120.5204	3.77	77.69
16.50	1.20	1.13	[15.90:	18.30]	4.896	23.832	13.1300	1.10	14.4430	163.2637	3.77	84.07
17.00	1.20	1.13	[16.40:	18.80]	8.042	31.234	17.5438	1.20	21.0526	237.9786	3.77	90.14
17.50	1.20	1.13	[16.90:	19.30]	11.495	35.367	22.5826	1.20	27.0991	306.3282	3.77	107.13
18.00	1.20	1.13	[17.40:	19.80]	15.067	37.319	27.3897	1.80	49.3014	557.3030	3.77	123.97
18.50	1.20	1.13	[17.90:	20.30]	18.670	40.562	31.9343	1.80	57.4817	649.7726	3.77	153.90
19.00	1.20	1.13	[18.40:	20.80]	25.312	44.664	36.2938	1.80	65.3289	738.4779	3.77	160.47
19.50	1.20	1.13	[18.90:	21.30]	32.715	46.277	39.8261	1.80	71.6870	810.3501	3.77	191.43
20.00	1.20	1.13	[19.40:	21.80]	35.757	46.229	42.2388	1.80	76.0299	859.4420	3.77	197.85
20.50	1.20	1.13	[19.90:	22.30]	37.710	46.212	44.2140	1.80	79.5853	899.6319	3.77	233.35
21.00	1.20	1.13	[20.40:	22.80]	41.382	46.214	45.6388	1.80	82.1499	928.6225	3.77	247.75
21.50	1.20	1.13	[20.90:	23.30]	45.485	46.187	46.2165	1.80	83.1898	940.3772	3.77	290.01
22.00	1.20	1.13	[21.40:	23.80]	46.267	46.139	46.2072	1.80	83.1729	940.1865	3.77	298.59
22.50	1.20	1.13	[21.90:	24.30]	46.220	46.092	46.1805	1.80	83.1249	939.6439	3.77	340.73
23.00	1.20	1.13	[22.40:	24.80]	46.212	46.044	46.1505	1.80	83.0709	939.0335	3.77	350.25
23.50	1.20	1.13	[22.90:	25.30]	46.215	45.997	46.1103	1.80	82.9985	938.2153	3.77	392.26
24.00	1.20	1.13	[23.40:	25.80]	46.177	45.949	46.0630	1.80	82.9134	937.2531	3.77	402.63
24.50	1.20	1.13	[23.90:	26.30]	46.130	45.932	46.0174	1.80	82.8313	936.3247	3.77	444.48
25.00	1.20	1.13	[24.40:	26.80]	46.082	45.934	45.9813	1.80	82.7664	935.5914	3.77	455.65
25.50	1.20	1.13	[24.90:	27.30]	46.035	45.877	45.9813	1.80	82.7664	935.5914	3.77	497.32
26.00	1.20	1.13	[25.40:	27.80]	45.987	45.779	45.9813	1.80	82.7664	935.5914	3.77	509.22
26.50	1.20	1.13	[25.90:	28.30]	45.940	45.712	45.9813	1.80	82.7664	935.5914	3.77	550.72
27.00	1.20	1.13	[26.40:	28.80]	45.932	45.664	45.9813	1.80	82.7664	935.5914	3.77	563.29

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax(t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	44.71	31.27	30.76	71.85	-31.39	51.32	-33.80	59.88	-21.97	40.65	0	31.94
10.50	45.72	32.00	32.01	73.14	-32.66	52.25	-35.17	60.95	-22.86	41.56	0	32.65
11.00	48.80	34.18	34.63	77.80	-35.34	55.57	-38.06	64.84	-24.74	44.36	0	34.86
11.50	50.48	35.36	35.87	80.47	-36.60	57.48	-39.42	67.06	-25.62	45.89	0	36.06
12.00	53.37	37.42	38.75	84.60	-39.54	60.43	-42.58	70.50	-27.68	48.52	0	38.12
12.50	54.00	37.91	40.15	85.06	-40.97	60.75	-44.12	70.88	-28.68	49.09	0	38.57
13.00	55.23	38.85	42.62	86.10	-43.49	61.50	-46.83	71.75	-30.44	50.21	0	39.45
13.50	55.45	39.05	43.71	85.92	-44.60	61.37	-48.04	71.60	-31.22	50.41	0	39.61
14.00	59.19	41.64	45.85	92.18	-46.78	65.84	-50.38	76.82	-32.75	53.81	0	42.28
14.50	64.71	45.35	46.50	102.84	-47.45	73.46	-51.10	85.70	-33.21	58.83	0	46.22
15.00	76.42	53.27	48.68	125.03	-49.67	89.31	-53.49	104.19	-34.77	69.48	0	54.59
15.50	92.29	63.92	50.28	155.84	-51.31	111.32	-55.26	129.87	-35.92	83.90	0	65.92
16.00	114.64	79.02	54.38	198.21	-55.49	141.58	-59.76	165.18	-38.85	104.22	0	81.89
16.50	140.48	96.46	58.85	247.34	-60.05	176.67	-64.67	206.11	-42.04	127.71	0	100.34
17.00	182.09	124.40	63.10	328.12	-64.39	234.37	-69.34	273.43	-45.07	165.53	0	130.06
17.50	228.15	155.67	74.99	413.46	-76.52	295.33	-82.41	344.55	-53.56	207.41	0	162.97
18.00	365.43	247.75	86.78	681.27	-88.55	486.62	-95.36	567.72	-61.98	332.21	0	261.02
18.50	432.62	293.54	107.73	803.67	-109.93	574.05	-118.39	669.73	-76.95	393.29	0	309.01
19.00	481.57	326.40	112.33	898.95	-114.62	642.11	-123.44	749.13	-80.24	437.79	0	343.98
19.50	539.18	365.83	134.00	1001.78	-136.74	715.56	-147.25	834.82	-95.71	490.16	0	385.13
20.00	568.22	385.41	138.50	1057.29	-141.32	755.21	-152.19	881.08	-98.93	516.56	0	405.87
20.50	613.16	416.55	163.34	1132.98	-166.68	809.27	-179.50	944.15	-116.67	557.42	0	437.97
21.00	637.74	433.42	173.42	1176.37	-176.96	840.27	-190.58	980.31	-123.87	579.76	0	455.53
21.50	673.20	458.46	203.01	1230.39	-207.15	878.85	-223.08	1025.32	-145.00	612.00	0	480.85
22.00	679.11	462.69	209.01	1238.78	-213.28	884.84	-229.68	1032.31	-149.29	617.37	0	485.08
22.50	708.34	483.58	238.51	1280.38	-243.38	914.56	-262.10	1066.98	-170.37	643.94	0	505.95
23.00	714.69	488.14	245.18	1289.29	-250.18	920.92	-269.42	1074.40	-175.13	649.72	0	510.50
23.50	743.69	508.87	274.58	1330.47	-280.18	950.34	-301.74	1108.73	-196.13	676.08	0	531.21
24.00	750.47	513.73	281.84	1339.89	-287.60	957.06	-309.72	1116.57	-201.32	682.25	0	536.05
24.50	779.30	534.35	311.14	1380.80	-317.49	986.29	-341.91	1150.67	-222.24	708.45	0	556.64
25.00	786.75	539.69	318.95	1391.24	-325.46	993.74	-350.50	1159.37	-227.82	715.23	0	561.96
25.50	815.92	560.53	348.13	1432.91	-355.23	1023.51	-382.56	1194.10	-248.66	741.75	0	582.80
26.00	824.25	566.47	356.45	1444.81	-363.73	1032.01	-391.71	1204.01	-254.61	749.32	0	588.75
26.50	853.30	587.22	385.50	1486.31	-393.37	1061.65	-423.63	1238.59	-275.36	775.73	0	609.50
27.00	862.10	593.51	394.30	1498.88	-402.35	1070.63	-433.30	1249.07	-281.65	783.73	0	615.79

Résultats du sondage SP 09

Compté à partir de l'excavation de 3.15 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl*(bar)	Pl*(bar)	Ple*(bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40:	11.80]	2.761	4.303	3.7338	1.10	4.1071	46.4269	3.77	45.32
10.50	1.20	1.13	[9.90:	12.30]	3.694	3.685	3.9356	1.10	4.3291	48.9364	3.77	48.59
11.00	1.20	1.13	[10.40:	12.80]	3.798	2.392	3.7709	1.10	4.1480	46.8891	3.77	52.60
11.50	1.20	1.13	[10.90:	13.30]	3.696	1.817	3.3989	1.10	3.7387	42.2627	3.77	55.97
12.00	1.20	1.13	[11.40:	13.80]	3.989	1.719	2.9749	1.10	3.2724	36.9913	3.77	60.46
12.50	1.20	1.13	[11.90:	14.30]	4.382	1.574	2.4480	1.10	2.6928	30.4389	3.77	63.22
13.00	1.20	1.13	[12.40:	14.80]	3.426	1.396	1.9159	1.10	2.1075	23.8233	3.77	65.63
13.50	1.20	1.13	[12.90:	15.30]	2.134	2.995	1.7201	1.10	1.8922	21.3890	3.77	66.73
14.00	1.20	1.13	[13.40:	15.80]	1.797	5.777	2.2443	1.10	2.4688	27.9069	3.77	70.34
14.50	1.20	1.13	[13.90:	16.30]	1.700	8.599	3.3759	1.10	3.7135	41.9778	3.77	71.07
15.00	1.20	1.13	[14.40:	16.80]	1.538	11.446	5.1253	1.10	5.6379	63.7304	3.77	74.40
15.50	1.20	1.13	[14.90:	17.30]	1.361	16.157	7.6210	1.10	8.3831	94.7631	3.77	77.05
16.00	1.20	1.13	[15.40:	17.80]	3.551	22.109	11.1448	1.10	12.2592	138.5783	3.77	84.05
16.50	1.20	1.13	[15.90:	18.30]	6.334	25.962	15.2100	1.10	16.7310	189.1267	3.77	91.17
17.00	1.20	1.13	[16.40:	18.80]	9.168	28.414	19.2604	1.20	23.1125	261.2637	3.77	96.76
17.50	1.20	1.13	[16.90:	19.30]	12.016	29.937	23.1707	1.20	27.8049	314.3063	3.77	110.02
18.00	1.20	1.13	[17.40:	19.80]	17.347	30.839	26.4947	1.30	34.4431	389.3444	3.77	121.19
18.50	1.20	1.13	[17.90:	20.30]	23.300	33.602	28.8957	1.30	37.5644	424.6282	3.77	145.56
19.00	1.20	1.13	[18.40:	20.80]	26.452	37.604	31.0722	1.80	55.9299	632.2316	3.77	157.65
19.50	1.20	1.13	[18.90:	21.30]	28.905	41.307	33.5382	1.80	60.3688	682.4086	3.77	188.65
20.00	1.20	1.13	[19.40:	21.80]	30.117	44.809	36.3347	1.80	65.4024	739.3087	3.77	194.98
20.50	1.20	1.13	[19.90:	22.30]	31.020	46.212	39.5351	1.80	71.1632	804.4282	3.77	230.53
21.00	1.20	1.13	[20.40:	22.80]	34.402	46.214	42.3997	1.80	76.3194	862.7145	3.77	244.84
21.50	1.20	1.13	[20.90:	23.30]	38.405	46.127	44.4382	1.80	79.9888	904.1931	3.77	287.15
22.00	1.20	1.13	[21.40:	23.80]	42.007	45.979	45.6480	1.80	82.1664	928.8090	3.77	295.64
22.50	1.20	1.13	[21.90:	24.30]	45.510	45.952	46.1028	1.80	82.9850	938.0627	3.77	337.83
23.00	1.20	1.13	[22.40:	24.80]	46.212	46.004	46.0688	1.80	82.9239	937.3718	3.77	347.27
23.50	1.20	1.13	[22.90:	25.30]	46.215	45.997	46.0270	1.80	82.8485	936.5197	3.77	389.32
24.00	1.20	1.13	[23.40:	25.80]	46.097	45.949	45.9863	1.80	82.7754	935.6931	3.77	399.62
24.50	1.20	1.13	[23.90:	26.30]	45.950	45.902	45.9659	1.80	82.7387	935.2777	3.77	441.51
25.00	1.20	1.13	[24.40:	26.80]	45.962	45.854	45.9530	1.80	82.7154	935.0149	3.77	452.61
25.50	1.20	1.13	[24.90:	27.30]	46.015	45.807	45.9530	1.80	82.7154	935.0149	3.77	494.33
26.00	1.20	1.13	[25.40:	27.80]	45.987	45.759	45.9530	1.80	82.7154	935.0149	3.77	506.15
26.50	1.20	1.13	[25.90:	28.30]	45.940	45.712	45.9530	1.80	82.7154	935.0149	3.77	547.69
27.00	1.20	1.13	[26.40:	28.80]	45.892	45.664	45.9530	1.80	82.7154	935.0149	3.77	560.20

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax(t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	54.94	38.14	31.72	91.75	-32.37	65.53	-34.86	76.46	-22.66	49.94	0	39.24
10.50	58.48	40.61	34.01	97.53	-34.71	69.66	-37.38	81.27	-24.29	53.16	0	41.77
11.00	60.26	41.93	36.82	99.49	-37.57	71.06	-40.46	82.91	-26.30	54.79	0	43.05
11.50	60.31	42.07	39.18	98.24	-39.98	70.17	-43.06	81.86	-27.99	54.83	0	43.08
12.00	60.81	42.56	42.32	97.45	-43.18	69.61	-46.50	81.21	-30.23	55.29	0	43.44
12.50	59.47	41.75	44.25	93.66	-45.15	66.90	-48.63	78.05	-31.61	54.06	0	42.48
13.00	57.85	40.76	45.94	89.45	-46.88	63.89	-50.48	74.54	-32.81	52.59	0	41.32
13.50	57.40	40.49	46.71	88.12	-47.66	62.94	-51.33	73.43	-33.36	52.18	0	41.00
14.00	63.19	44.47	49.24	98.24	-50.24	70.17	-54.10	81.87	-35.17	57.44	0	45.13
14.50	70.74	49.53	49.75	113.05	-50.77	80.75	-54.67	94.21	-35.54	64.31	0	50.53
15.00	83.94	58.44	52.08	138.13	-53.14	98.66	-57.23	115.10	-37.20	76.31	0	59.96
15.50	101.31	70.11	53.93	171.81	-55.03	122.72	-59.27	143.17	-38.52	92.10	0	72.37
16.00	128.13	88.22	58.84	222.63	-60.04	159.02	-64.66	185.52	-42.03	116.48	0	91.52
16.50	158.38	108.63	63.82	280.29	-65.12	200.21	-70.13	233.58	-45.58	143.98	0	113.13
17.00	198.36	135.47	67.73	358.02	-69.11	255.73	-74.43	298.35	-48.38	180.33	0	141.69
17.50	234.17	159.78	77.01	424.33	-78.58	303.09	-84.63	353.60	-55.01	212.88	0	167.26
18.00	279.51	190.38	84.83	510.53	-86.56	364.67	-93.22	425.45	-60.59	254.10	0	199.65
18.50	314.21	214.32	101.89	570.19	-103.97	407.28	-111.97	475.16	-72.78	285.64	0	224.43
19.00	426.47	289.57	110.35	789.88	-112.61	564.20	-121.27	658.23	-78.82	387.70	0	304.62
19.50	473.26	321.80	132.06	871.06	-134.75	622.19	-145.12	725.88	-94.33	430.24	0	338.04
20.00	506.14	343.93	136.49	934.29	-139.27	667.35	-149.99	778.58	-97.49	460.13	0	361.53
20.50	563.58	383.41	161.37	1034.95	-164.66	739.25	-177.33	862.46	-115.26	512.35	0	402.56
21.00	602.74	409.99	171.39	1107.55	-174.88	791.11	-188.34	922.96	-122.42	547.95	0	430.53
21.50	653.10	444.97	201.00	1191.34	-205.10	850.96	-220.88	992.78	-143.57	593.73	0	466.50
22.00	671.35	457.42	206.95	1224.45	-211.17	874.61	-227.42	1020.38	-147.82	610.32	0	479.54
22.50	705.51	481.60	236.48	1275.90	-241.31	911.35	-259.87	1063.25	-168.92	641.38	0	503.94
23.00	711.77	486.09	243.09	1284.64	-248.05	917.60	-267.13	1070.53	-173.64	647.07	0	508.41
23.50	740.78	506.83	272.52	1325.84	-278.09	947.03	-299.48	1104.87	-194.66	673.44	0	529.13
24.00	747.58	511.71	279.73	1335.31	-285.44	953.80	-307.40	1112.76	-199.81	679.62	0	533.99
24.50	776.70	532.52	309.06	1376.79	-315.37	983.42	-339.62	1147.32	-220.76	706.09	0	554.78
25.00	784.33	537.97	316.82	1387.62	-323.29	991.16	-348.16	1156.35	-226.30	713.03	0	560.24
25.50	813.54	558.83	346.03	1429.34	-353.09	1020.96	-380.25	1191.12	-247.16	739.58	0	581.10
26.00	821.81	564.75	354.31	1441.17	-361.54	1029.41	-389.35	1200.97	-253.08	747.10	0	587.01
26.50	850.89	585.52	383.39	1482.71	-391.21	1059.08	-421.30	1235.59	-273.85	773.54	0	607.78
27.00	859.65	591.77	392.14	1495.21	-400.14	1068.01	-430.92	1246.01	-280.10	781.50	0	614.03

Résultats du sondage SP 10

Compté à partir de l'excavation de 4.20 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl*(bar)	Pl*(bar)	Ple*(bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40;	11.80]	15.447	18.339	17.0830	1.20	20.4996	231.7275	3.77	73.23
10.50	1.20	1.13	[9.90;	12.30]	16.450	18.142	17.5918	1.20	21.1101	238.6286	3.77	80.82
11.00	1.20	1.13	[10.40;	12.80]	16.972	17.444	17.8072	1.20	21.3686	241.5507	3.77	87.67
11.50	1.20	1.13	[10.90;	13.30]	17.375	16.927	17.8022	1.20	21.3626	241.4828	3.77	95.31
12.00	1.20	1.13	[11.40;	13.80]	17.897	16.529	17.6155	1.20	21.1386	238.9507	3.77	102.21
12.50	1.20	1.13	[11.90;	14.30]	18.450	18.742	17.3947	1.20	20.8736	235.9552	3.77	109.88
13.00	1.20	1.13	[12.40;	14.80]	18.002	22.694	17.8930	1.20	21.4716	242.7150	3.77	116.84
13.50	1.20	1.13	[12.90;	15.30]	17.305	28.477	19.4693	1.20	23.3631	264.0965	3.77	124.53
14.00	1.20	1.13	[13.40;	15.80]	16.847	35.479	22.5788	1.20	27.0946	306.2774	3.77	131.53
14.50	1.20	1.13	[13.90;	16.30]	16.450	38.702	26.9951	1.20	32.3941	366.1829	3.77	143.22
15.00	1.20	1.13	[14.40;	16.80]	19.532	39.404	31.4555	1.30	40.8922	462.2449	3.77	156.72
15.50	1.20	1.13	[14.90;	17.30]	23.485	41.667	35.3545	1.30	45.9608	519.5408	3.77	178.63
16.00	1.20	1.13	[15.40;	17.80]	29.877	44.969	38.8713	1.80	69.9684	790.9228	3.77	193.27
16.50	1.20	1.13	[15.90;	18.30]	36.880	46.232	41.5026	1.80	74.7047	844.4614	3.77	221.53
17.00	1.20	1.13	[16.40;	18.80]	38.842	46.134	43.1313	1.80	77.6364	877.6019	3.77	230.84
17.50	1.20	1.13	[16.90;	19.30]	39.545	46.037	44.5672	1.80	80.2209	906.8171	3.77	263.53
18.00	1.20	1.13	[17.40;	19.80]	42.327	45.939	45.6630	1.80	82.1934	929.1142	3.77	280.47
18.50	1.20	1.13	[17.90;	20.30]	45.630	45.872	46.0632	1.80	82.9138	937.2573	3.77	319.73
19.00	1.20	1.13	[18.40;	20.80]	46.212	45.824	45.9913	1.80	82.7844	935.7949	3.77	331.23
19.50	1.20	1.13	[18.90;	21.30]	46.115	45.807	45.9176	1.80	82.6517	934.2943	3.77	370.51
20.00	1.20	1.13	[19.40;	21.80]	46.017	45.809	45.8638	1.80	82.5549	933.2006	3.77	382.95
20.50	1.20	1.13	[19.90;	22.30]	45.920	45.752	45.8272	1.80	82.4889	932.4545	3.77	422.20
21.00	1.20	1.13	[20.40;	22.80]	45.862	45.654	45.7888	1.80	82.4199	931.6745	3.77	435.48
21.50	1.20	1.13	[20.90;	23.30]	45.815	45.617	45.7440	1.80	82.3393	930.7632	3.77	474.67
22.00	1.20	1.13	[21.40;	23.80]	45.807	45.619	45.7047	1.80	82.2684	929.9620	3.77	488.71
22.50	1.20	1.13	[21.90;	24.30]	45.810	45.562	45.6618	1.80	82.1912	929.0888	3.77	527.81
23.00	1.20	1.13	[22.40;	24.80]	45.732	45.464	45.6063	1.80	82.0914	927.9612	3.77	542.56
23.50	1.20	1.13	[22.90;	25.30]	45.635	45.397	45.5524	1.80	81.9943	926.8633	3.77	581.56
24.00	1.20	1.13	[23.40;	25.80]	45.617	45.349	45.5013	1.80	81.9024	925.8247	3.77	596.94
24.50	1.20	1.13	[23.90;	26.30]	45.620	45.302	45.5013	1.80	81.9024	925.8247	3.77	635.82
25.00	1.20	1.13	[24.40;	26.80]	45.542	45.254	45.5013	1.80	81.9024	925.8247	3.77	651.80
25.50	1.20	1.13	[24.90;	27.30]	45.445	45.237	45.5013	1.80	81.9024	925.8247	3.77	690.55
26.00	1.20	1.13	[25.40;	27.80]	45.387	45.239	45.5013	1.80	81.9024	925.8247	3.77	707.07

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax(t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	167.12	113.86	51.26	304.95	-52.31	217.82	-56.33	254.13	-36.61	151.93	0	119.37
10.50	175.89	119.95	56.57	319.45	-57.73	228.18	-62.17	266.21	-40.41	159.90	0	125.63
11.00	182.14	124.35	61.37	329.22	-62.62	235.16	-67.44	274.35	-43.83	165.58	0	130.10
11.50	187.46	128.15	66.71	336.79	-68.08	240.56	-73.31	280.66	-47.65	170.41	0	133.90
12.00	191.02	130.76	71.55	341.16	-73.01	243.69	-78.62	284.30	-51.11	173.66	0	136.45
12.50	194.90	133.59	76.92	345.84	-78.49	247.03	-84.53	288.20	-54.94	177.18	0	139.21
13.00	203.14	139.32	81.79	359.55	-83.46	256.82	-89.88	299.63	-58.42	184.68	0	145.10
13.50	219.22	150.30	87.17	388.63	-88.95	277.59	-95.79	323.86	-62.27	199.29	0	156.59
14.00	245.21	167.86	92.07	437.81	-93.95	312.72	-101.18	364.84	-65.76	222.92	0	175.15
14.50	283.34	193.67	100.25	509.40	-102.30	363.86	-110.17	424.50	-71.61	257.58	0	202.39
15.00	340.83	232.44	109.70	618.96	-111.94	442.12	-120.55	515.80	-78.36	309.84	0	243.45
15.50	384.81	262.50	125.04	698.17	-127.59	498.69	-137.41	581.81	-89.32	349.83	0	274.87
16.00	530.75	360.27	135.29	984.19	-138.05	702.99	-148.67	820.16	-96.63	482.50	0	379.11
16.50	577.30	392.25	155.07	1065.99	-158.23	761.42	-170.41	888.32	-110.76	524.82	0	412.36
17.00	600.39	407.95	161.59	1108.44	-164.88	791.74	-177.57	923.70	-115.42	545.81	0	428.85
17.50	637.88	434.04	184.47	1170.35	-188.23	835.96	-202.71	975.29	-131.76	579.89	0	455.63
18.00	660.89	449.94	196.33	1209.59	-200.34	863.99	-215.75	1007.99	-140.24	600.81	0	472.06
18.50	692.44	472.29	223.81	1256.99	-228.38	897.85	-245.95	1047.49	-159.87	629.49	0	494.60
19.00	699.76	477.55	231.86	1267.08	-236.60	905.02	-254.80	1055.86	-165.62	636.15	0	499.83
19.50	726.51	496.69	259.36	1304.81	-264.65	932.00	-285.01	1087.34	-185.26	660.46	0	518.93
20.00	734.66	502.54	268.06	1316.15	-273.53	940.10	-294.57	1096.79	-191.47	667.88	0	524.76
20.50	761.77	521.92	295.54	1354.65	-301.57	967.61	-324.77	1128.88	-211.10	692.51	0	544.12
21.00	770.67	528.30	304.83	1367.15	-311.05	976.54	-334.98	1139.29	-217.74	700.61	0	550.48
21.50	797.65	547.59	332.27	1405.43	-339.05	1003.88	-365.13	1171.19	-237.33	725.13	0	569.75
22.00	807.08	554.34	342.10	1418.67	-349.08	1013.34	-375.93	1182.23	-244.35	733.71	0	576.48
22.50	834.01	573.60	369.47	1456.90	-377.01	1040.64	-406.01	1214.09	-263.91	758.19	0	595.72
23.00	843.77	580.60	379.79	1470.52	-387.54	1050.37	-417.35	1225.43	-271.28	767.06	0	602.69
23.50	870.52	599.73	407.09	1508.42	-415.40	1077.44	-447.35	1257.02	-290.78	791.38	0	621.80
24.00	880.77	607.08	417.86	1522.77	-426.39	1087.69	-459.19	1268.97	-298.47	800.70	0	629.12
24.50	907.99	626.52	445.08	1561.65	-454.16	1115.46	-489.09	1301.37	-317.91	825.44	0	648.56
25.00	919.17	634.51	456.26	1577.62	-465.57	1126.87	-501.38	1314.69	-325.90	835.61	0	656.55
25.50	946.30	653.88	483.39	1616.38	-493.25	1154.55	-531.19	1346.98	-345.28	860.27	0	675.93
26.00	957.86	662.14	494.95	1632.90	-505.05	1166.35	-543.90	1360.75	-353.54	870.78	0	684.19

Résultats du sondage SP 11

Compté à partir de l'excavation de 4.40 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl* (bar)	Pl *(bar)	Ple* (bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40;	11.80]	18.407	21.479	19.2305	1.20	23.0766	260.8579	3.77	69.69
10.50	1.20	1.13	[9.90;	12.30]	18.860	24.232	20.0663	1.20	24.0796	272.1958	3.77	77.30
11.00	1.20	1.13	[10.40;	12.80]	18.872	27.684	21.5347	1.20	25.8416	292.1134	3.77	83.86
11.50	1.20	1.13	[10.90;	13.30]	18.775	30.687	23.7122	1.20	28.4546	321.6508	3.77	95.01
12.00	1.20	1.13	[11.40;	13.80]	20.117	33.389	26.3655	1.20	31.6386	357.6427	3.77	107.47
12.50	1.20	1.13	[11.90;	14.30]	21.820	35.882	29.2215	1.20	35.0659	396.3844	3.77	124.22
13.00	1.20	1.13	[12.40;	14.80]	24.922	38.234	32.1022	1.30	41.7328	471.7478	3.77	132.08
13.50	1.20	1.13	[12.90;	15.30]	28.375	41.397	34.8115	1.30	45.2550	511.5626	3.77	149.11
14.00	1.20	1.13	[13.40;	15.80]	31.227	45.099	37.6005	1.30	48.8807	552.5469	3.77	157.49
14.50	1.20	1.13	[13.90;	16.30]	33.930	46.552	40.4540	1.30	52.5903	594.4802	3.77	178.68
15.00	1.20	1.13	[14.40;	16.80]	36.352	46.504	42.8205	1.30	55.6667	629.2558	3.77	193.98
15.50	1.20	1.13	[14.90;	17.30]	38.705	46.457	44.6855	1.30	58.0912	656.6624	3.77	221.40
16.00	1.20	1.13	[15.40;	17.80]	42.137	46.409	45.9605	1.30	59.7487	675.3987	3.77	231.56
16.50	1.20	1.13	[15.90;	18.30]	45.840	44.892	46.3680	1.30	60.2784	681.3870	3.77	263.36
17.00	1.20	1.13	[16.40;	18.80]	46.542	42.394	45.7747	1.80	82.3944	931.3863	3.77	281.03
17.50	1.20	1.13	[16.90;	19.30]	46.495	42.837	44.8390	1.80	80.7103	912.3489	3.77	319.32
18.00	1.20	1.13	[17.40;	19.80]	46.447	45.239	44.3322	1.80	79.7979	902.0355	3.77	331.70
18.50	1.20	1.13	[17.90;	20.30]	46.400	46.172	44.2438	1.80	79.6389	900.2381	3.77	370.07
19.00	1.20	1.13	[18.40;	20.80]	44.392	46.124	44.3597	1.80	79.8474	902.5950	3.77	383.38
19.50	1.20	1.13	[18.90;	21.30]	41.895	46.047	44.9738	1.80	80.9529	915.0916	3.77	421.78
20.00	1.20	1.13	[19.40;	21.80]	43.317	45.949	45.7622	1.80	82.3719	931.1320	3.77	435.93
20.50	1.20	1.13	[19.90;	22.30]	45.720	44.502	45.9657	1.80	82.7383	935.2735	3.77	474.30
21.00	1.20	1.13	[20.40;	22.80]	46.162	42.154	45.3805	1.80	81.6849	923.3661	3.77	489.21
21.50	1.20	1.13	[20.90;	23.30]	46.115	42.567	44.4784	1.80	80.0612	905.0112	3.77	527.52
22.00	1.20	1.13	[21.40;	23.80]	46.027	44.819	43.9822	1.80	79.1679	894.9139	3.77	543.13
22.50	1.20	1.13	[21.90;	24.30]	45.930	45.662	43.8872	1.80	78.9969	892.9810	3.77	581.36
23.00	1.20	1.13	[22.40;	24.80]	44.032	45.564	43.9813	1.80	79.1664	894.8970	3.77	597.60
23.50	1.20	1.13	[22.90;	25.30]	41.685	45.497	44.5368	1.80	80.1662	906.1982	3.77	635.74
24.00	1.20	1.13	[23.40;	25.80]	43.017	45.449	45.2638	1.80	81.4749	920.9923	3.77	652.56
24.50	1.20	1.13	[23.90;	26.30]	45.270	44.052	45.2638	1.80	81.4749	920.9923	3.77	690.59
25.00	1.20	1.13	[24.40;	26.80]	45.642	41.754	45.2638	1.80	81.4749	920.9923	3.77	707.95
25.50	1.20	1.13	[24.90;	27.30]	45.545	42.187	45.2638	1.80	81.4749	920.9923	3.77	745.86
26.00	1.20	1.13	[25.40;	27.80]	45.487	44.439	45.2638	1.80	81.4749	920.9923	3.77	763.71

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax (t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	179.21	121.80	48.78	330.55	-49.78	236.11	-53.61	275.46	-34.84	162.92	0	128.01
10.50	190.21	129.38	54.11	349.50	-55.22	249.64	-59.47	291.25	-38.65	172.92	0	135.87
11.00	204.76	139.30	58.70	375.97	-59.90	268.55	-64.50	313.31	-41.93	186.14	0	146.25
11.50	227.33	154.72	66.50	416.66	-67.86	297.61	-73.08	347.21	-47.50	206.66	0	162.38
12.00	254.05	172.95	75.23	465.11	-76.76	332.22	-82.67	387.59	-53.73	230.95	0	181.46
12.50	285.15	194.24	86.95	520.61	-88.73	371.86	-95.55	433.84	-62.11	259.22	0	203.68
13.00	328.33	223.29	92.46	608.83	-94.35	431.31	-101.60	503.19	-66.04	298.48	0	234.52
13.50	360.16	245.08	104.38	660.67	-106.51	471.91	-114.70	550.56	-74.56	327.42	0	257.26
14.00	386.52	262.93	110.24	710.04	-112.49	507.17	-121.15	591.70	-78.74	351.38	0	276.08
14.50	422.32	287.50	125.08	773.16	-127.63	552.26	-137.45	644.30	-89.34	383.93	0	301.66
15.00	450.41	306.74	135.78	823.23	-138.55	588.02	-149.21	686.03	-96.99	409.47	0	321.72
15.50	483.31	329.59	154.98	878.06	-158.14	627.19	-170.31	731.72	-110.70	439.37	0	345.22
16.00	499.79	340.91	162.09	906.95	-165.40	647.82	-178.12	755.80	-115.78	454.35	0	356.99
16.50	525.05	358.81	184.36	944.75	-188.12	674.82	-202.59	787.29	-131.68	477.32	0	375.03
17.00	662.41	450.98	196.72	1212.41	-200.73	866.01	-216.17	1010.34	-140.51	602.19	0	473.15
17.50	679.70	463.78	223.53	1231.67	-228.09	879.77	-245.63	1026.39	-159.66	617.91	0	485.50
18.00	683.21	466.53	232.19	1233.73	-236.93	881.24	-255.15	1028.11	-165.85	621.10	0	488.01
18.50	709.17	485.12	259.05	1270.31	-264.34	907.36	-284.67	1058.59	-185.04	644.70	0	506.55
19.00	719.67	492.56	268.37	1285.98	-273.85	918.56	-294.91	1071.65	-191.69	654.24	0	514.05
19.50	752.79	515.92	295.24	1336.87	-301.27	954.91	-324.44	1114.06	-210.89	684.35	0	537.71
20.00	770.72	528.34	305.15	1367.06	-311.38	976.47	-335.33	1139.22	-217.96	700.65	0	550.51
20.50	799.64	548.91	332.01	1409.57	-338.78	1006.84	-364.84	1174.64	-237.15	726.95	0	571.17
21.00	804.13	552.39	342.45	1412.58	-349.44	1008.98	-376.32	1177.15	-244.61	731.03	0	574.38
21.50	821.77	565.43	369.27	1432.54	-376.80	1023.24	-405.79	1193.78	-263.76	747.07	0	586.98
22.00	827.65	569.87	380.19	1438.05	-387.95	1027.18	-417.79	1198.37	-271.57	752.41	0	591.18
22.50	853.45	588.34	406.96	1474.35	-415.26	1053.10	-447.20	1228.62	-290.68	775.86	0	609.60
23.00	865.77	597.10	418.32	1492.50	-426.86	1066.07	-459.70	1243.75	-298.80	787.07	0	618.41
23.50	898.12	619.94	445.02	1541.94	-454.10	1101.39	-489.03	1284.95	-317.87	816.47	0	641.51
24.00	917.29	633.28	456.79	1573.55	-466.12	1123.97	-501.97	1311.30	-326.28	833.90	0	655.21
24.50	943.91	652.29	483.42	1611.59	-493.28	1151.13	-531.23	1342.99	-345.30	858.10	0	674.22
25.00	956.06	660.97	495.56	1628.94	-505.68	1163.53	-544.57	1357.45	-353.97	869.14	0	682.90
25.50	982.60	679.93	522.10	1666.86	-532.76	1190.61	-573.74	1389.05	-372.93	893.27	0	701.86
26.00	995.09	688.85	534.60	1684.70	-545.51	1203.36	-587.47	1403.92	-381.85	904.63	0	710.78

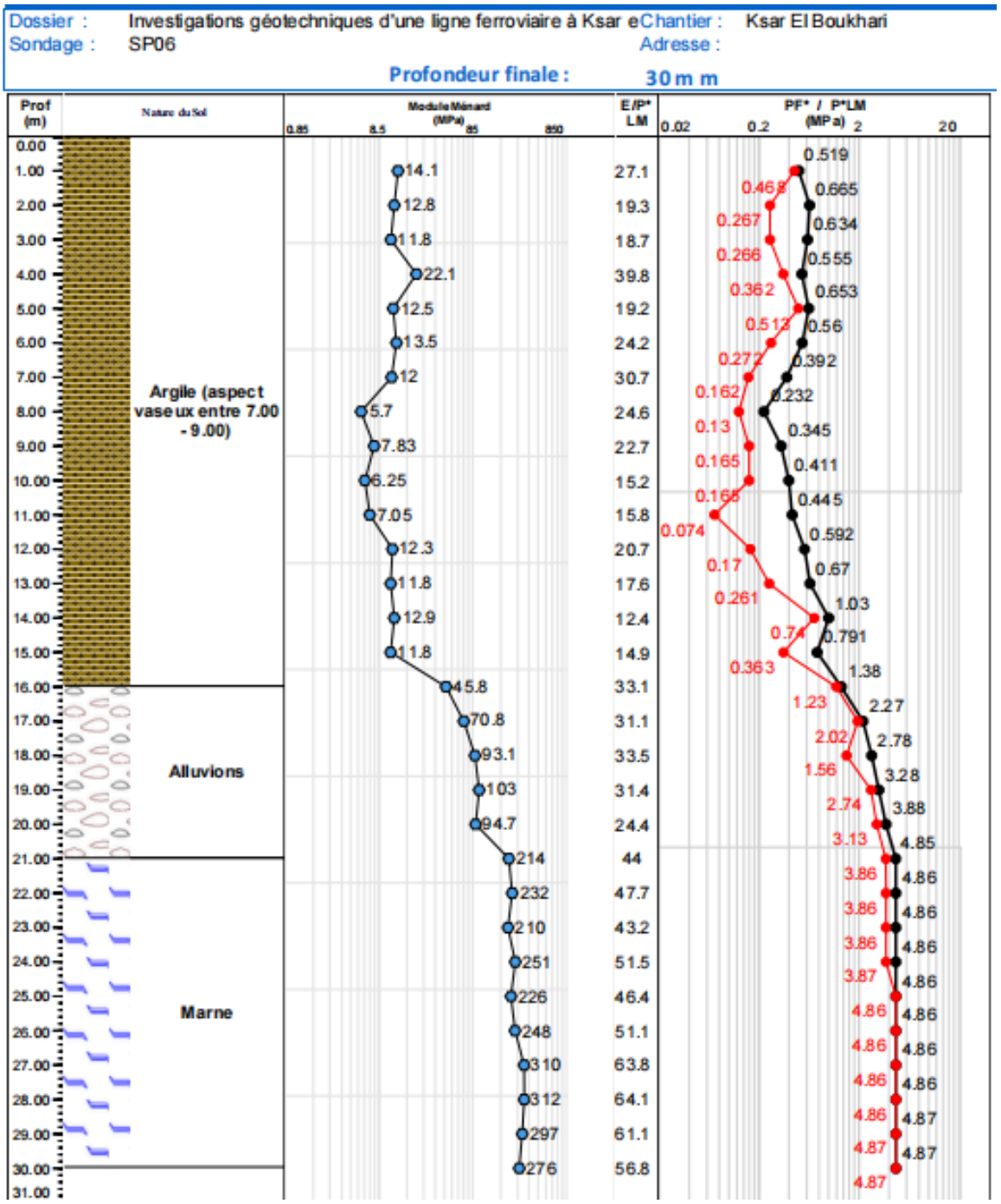
Résultats du sondage SP 12

Compté à partir de l'excavation de 4.00 m :

D(m)	B (m)	s(m²)	zone utile		Pl* (bar)	Pl *(bar)	Ple* (bar)	Kp	ql (bar)	Qp (t)	p (m)	Qf (t)
10.00	1.20	1.13	[9.40;	11.80]	8.823	21.139	12.7217	1.20	15.2660	172.5669	3.77	53.83
10.50	1.20	1.13	[9.90;	12.30]	11.346	25.402	15.5538	1.20	18.6645	210.9835	3.77	61.11
11.00	1.20	1.13	[10.40;	12.80]	11.532	28.304	18.7163	1.20	22.4596	253.8833	3.77	66.16
11.50	1.20	1.13	[10.90;	13.30]	11.135	31.027	22.5430	1.20	27.0516	305.7913	3.77	77.15
12.00	1.20	1.13	[11.40;	13.80]	16.097	33.629	26.5530	1.20	31.8636	360.1861	3.77	88.71
12.50	1.20	1.13	[11.90;	14.30]	22.400	38.392	29.9551	1.20	35.9461	406.3347	3.77	105.73
13.00	1.20	1.13	[12.40;	14.80]	25.982	44.594	33.5030	1.20	40.2036	454.4615	3.77	112.43
13.50	1.20	1.13	[12.90;	15.30]	28.885	47.077	37.4918	1.20	44.9901	508.5681	3.77	133.61
14.00	1.20	1.13	[13.40;	15.80]	31.547	47.079	40.9997	1.20	49.1996	556.1523	3.77	147.18
14.50	1.20	1.13	[13.90;	16.30]	34.150	47.052	43.9628	1.20	52.7554	596.3465	3.77	178.50
15.00	1.20	1.13	[14.40;	16.80]	39.632	47.004	46.1347	1.80	83.0424	938.7113	3.77	193.78
15.50	1.20	1.13	[14.90;	17.30]	45.835	44.347	46.8563	1.80	84.3414	953.3952	3.77	231.48
16.00	1.20	1.13	[15.40;	17.80]	47.077	39.949	45.8555	1.80	82.5399	933.0310	3.77	242.10
16.50	1.20	1.13	[15.90;	18.30]	47.080	40.772	44.2384	1.80	79.6292	900.1279	3.77	280.05
17.00	1.20	1.13	[16.40;	18.80]	47.042	45.074	43.3755	1.80	78.0759	882.5700	3.77	291.82
17.50	1.20	1.13	[16.90;	19.30]	46.995	46.617	43.2461	1.80	77.8430	879.9376	3.77	329.93
18.00	1.20	1.13	[17.40;	19.80]	43.467	46.319	43.4313	1.80	78.1764	883.7060	3.77	342.71
18.50	1.20	1.13	[17.90;	20.30]	39.070	46.322	44.4713	1.80	80.0484	904.8671	3.77	380.90
19.00	1.20	1.13	[18.40;	20.80]	41.632	46.524	45.8813	1.80	82.5864	933.5567	3.77	394.60
19.50	1.20	1.13	[18.90;	21.30]	45.935	46.577	46.4640	1.80	83.6353	945.4131	3.77	432.80
20.00	1.20	1.13	[19.40;	21.80]	46.557	46.529	46.4513	1.80	83.6124	945.1546	3.77	447.32
20.50	1.20	1.13	[19.90;	22.30]	46.260	46.482	46.4715	1.80	83.6488	945.5658	3.77	485.50
21.00	1.20	1.13	[20.40;	22.80]	46.362	46.434	46.5105	1.80	83.7189	946.3584	3.77	500.77
21.50	1.20	1.13	[20.90;	23.30]	46.565	46.387	46.4995	1.80	83.6990	946.1338	3.77	538.89
22.00	1.20	1.13	[21.40;	23.80]	46.567	46.339	46.4530	1.80	83.6154	945.1885	3.77	554.83
22.50	1.20	1.13	[21.90;	24.30]	46.520	46.322	46.4074	1.80	83.5333	944.2601	3.77	592.88
23.00	1.20	1.13	[22.40;	24.80]	46.472	46.324	46.3713	1.80	83.4684	943.5268	3.77	609.44
23.50	1.20	1.13	[22.90;	25.30]	46.425	46.297	46.3438	1.80	83.4189	942.9672	3.77	647.39
24.00	1.20	1.13	[23.40;	25.80]	46.377	46.249	46.3172	1.80	83.3709	942.4247	3.77	664.52
24.50	1.20	1.13	[23.90;	26.30]	46.330	46.172	46.3172	1.80	83.3709	942.4247	3.77	702.37
25.00	1.20	1.13	[24.40;	26.80]	46.322	46.074	46.3172	1.80	83.3709	942.4247	3.77	720.02
25.50	1.20	1.13	[24.90;	27.30]	46.325	46.007	46.3172	1.80	83.3709	942.4247	3.77	757.76
26.00	1.20	1.13	[25.40;	27.80]	46.287	45.959	46.3172	1.80	83.3709	942.4247	3.77	775.88

					ETAT LIMITES ULTIMES				ETAT LIMITES DE SERVICE			
D(m)	Qc (t)	Qn (t)	Qtc (t)	Ql (t)	fondamentales Qmin(t)	fondamentales Qmax (t)	accidentelles Qmin(t)	accidentelles Qmax(t)	rares Qmin (t)	rares Qmax (t)	quasi permanentes Qmin (t)	quasi permanentes Qmax (t)
10.00	123.96	84.43	37.68	226.39	-38.45	161.71	-41.40	188.66	-26.91	112.69	0	88.54
10.50	148.27	100.88	42.78	272.09	-43.65	194.35	-47.01	226.74	-30.55	134.79	0	105.91
11.00	173.25	117.71	46.31	320.04	-47.25	228.60	-50.89	266.70	-33.08	157.50	0	123.75
11.50	206.90	140.51	54.01	382.95	-55.11	273.53	-59.35	319.12	-38.58	188.09	0	147.79
12.00	242.19	164.42	62.10	448.89	-63.36	320.64	-68.24	374.08	-44.35	220.17	0	172.99
12.50	277.18	188.31	74.01	512.07	-75.52	365.76	-81.33	426.72	-52.87	251.98	0	197.99
13.00	305.93	207.70	78.70	566.89	-80.30	404.92	-86.48	472.41	-56.21	278.12	0	218.52
13.50	347.81	236.33	93.52	642.17	-95.43	458.70	-102.77	535.14	-66.80	316.19	0	248.43
14.00	381.10	258.98	103.03	703.34	-105.13	502.38	-113.22	586.11	-73.59	346.46	0	272.22
14.50	423.12	288.03	124.95	774.85	-127.50	553.46	-137.31	645.70	-89.25	384.66	0	302.23
15.00	605.00	409.80	135.65	1132.50	-138.42	808.93	-149.06	943.75	-96.89	550.00	0	432.15
15.50	638.73	433.54	162.03	1184.87	-165.34	846.34	-178.06	987.39	-115.74	580.67	0	456.24
16.00	635.98	432.06	169.47	1175.13	-172.93	839.38	-186.23	979.27	-121.05	578.17	0	454.27
16.50	646.10	440.07	196.04	1180.18	-200.04	842.98	-215.42	983.48	-140.03	587.36	0	461.50
17.00	645.56	440.10	204.27	1174.39	-208.44	838.85	-224.48	978.66	-145.91	586.87	0	461.11
17.50	670.92	458.28	230.95	1209.86	-235.66	864.19	-253.79	1008.22	-164.96	609.92	0	479.23
18.00	681.75	465.93	239.90	1226.42	-244.79	876.01	-263.63	1022.02	-171.36	619.77	0	486.97
18.50	719.06	492.07	266.63	1285.76	-272.07	918.40	-293.00	1071.47	-190.45	653.69	0	513.61
19.00	743.00	508.48	276.22	1328.15	-281.85	948.68	-303.54	1106.79	-197.30	675.45	0	530.71
19.50	775.66	531.54	302.96	1378.21	-309.14	984.44	-332.92	1148.51	-216.40	705.15	0	554.05
20.00	785.70	538.71	313.12	1392.48	-319.51	994.63	-344.09	1160.40	-223.66	714.27	0	561.22
20.50	812.63	557.94	339.85	1431.06	-346.78	1022.19	-373.46	1192.55	-242.75	738.76	0	580.45
21.00	823.72	565.84	350.54	1447.12	-357.69	1033.66	-385.20	1205.94	-250.38	748.83	0	588.37
21.50	850.29	584.82	377.22	1485.02	-384.92	1060.73	-414.53	1237.52	-269.44	772.99	0	607.35
22.00	860.98	592.48	388.38	1500.02	-396.31	1071.44	-426.79	1250.02	-277.42	782.71	0	614.98
22.50	887.15	611.19	415.02	1537.14	-423.48	1097.96	-456.06	1280.95	-296.44	806.50	0	633.68
23.00	898.37	619.23	426.61	1552.97	-435.31	1109.26	-468.80	1294.14	-304.72	816.70	0	641.69
23.50	924.66	638.02	453.18	1590.36	-462.42	1135.97	-498.00	1325.30	-323.70	840.60	0	660.47
24.00	936.38	646.40	465.16	1606.95	-474.66	1147.82	-511.17	1339.12	-332.26	851.25	0	668.84
24.50	962.87	665.33	491.66	1644.80	-501.69	1174.85	-540.29	1370.66	-351.19	875.34	0	687.77
25.00	975.23	674.15	504.01	1662.44	-514.30	1187.46	-553.86	1385.37	-360.01	886.57	0	696.59
25.50	1001.64	693.02	530.43	1700.18	-541.25	1214.42	-582.89	1416.82	-378.88	910.58	0	715.46
26.00	1014.33	702.08	543.12	1718.31	-554.20	1227.36	-596.83	1431.92	-387.94	922.12	0	724.52

Résultats de l'essai pressiométrique sous la semelle de la pile 05



ANNEXE D
FERRAILLAGE

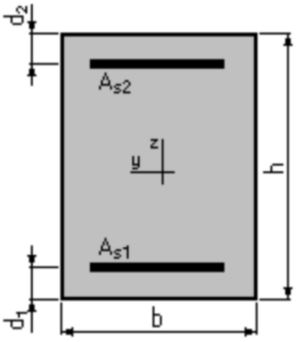
Calcul de Section en Flexion Simple (dalle en porte-a-faux)

1. Hypothčses:

Béton: fc28 = 30,0 (MPa) Acier: fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration non préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



b = 100,0 (cm)
h = 40,0 (cm)
d1 = 5,0 (cm)
d2 = 5,0 (cm)

3. Moments appliqués:

	M_{max} (kN*m)	**Mmin (kN*m)**
Etat Limite Ultime (fondamental)	450,61	0,00
Etat Limite de Service	0,00	0,00
Etat Limite Ultime (Accidentel)	0,00	0,00

4. Résultats:

Sections d'Acier:
Section théorique As1 = 33,8 (cm2) Section théorique As2 = 0,0 (cm2)
Section minimum As min = 9,8 (cm2) Section maximum As max = 87,5 (cm2)
théorique ρ = 0,97 (%)
minimum ρ min = 0,28 (%) maximum ρmax = 2,19 (%)

Analyse par Cas:

Cas ELU Mmax = 450,61 (kN*m) Mmin = 0,00 (kN*m)
Coefficient de sécurité: 1,00 Pivot: B
Position de l'axe neutre: y = 10,8 (cm)
Bras de levier: Z = 30,7 (cm)
Déformation du béton: εb = 3,50 (‰)

Déformation de l'acier: $\varepsilon_s = 7{,}84$ (‰)
Contrainte de l'acier:
tendue: $\sigma_s = 434{,}8$ (MPa)

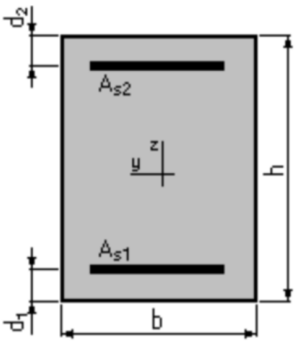
Calcul de Section en Flexion Simple (dalle centrale)

1. Hypothčses:

Béton: fc28 = 30,0 (MPa) Acier: fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration non préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



b = 100,0 (cm)
h = 40,0 (cm)
d1 = 5,0 (cm)
d2 = 5,0 (cm)

3. Moments appliqués:

	M_{max} (kN*m)	Mmin (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	213,53	-350,00
Etat Limite de Service	162,94	-280,00
Etat Limite Ultime (Accidentel)	0,00	0,00

4. Résultats:

Sections d'Acier:
Section théorique As1 = 14,8 (cm2) Section théorique As2 = 25,3 (cm2)
Section minimum As min = 9,8 (cm2) Section maximum As max = 87,5 (cm2)
théorique ρ = 1,15 (%)
minimum ρ min = 0,28 (%) maximum ρ max = 2,19 (%)

Analyse par Cas:

Cas ELU Mmax = 213,53 (kN*m) Mmin = -350,00 (kN*m)
Coefficient de sécurité: 1,00 Pivot: A
Position de l'axe neutre: y = 6,7 (cm)
Bras de levier: Z = 32,3 (cm)

Déformation du béton: εb = 2,39 (‰)
Déformation de l'acier: εs = 10,00 (‰)
Contrainte de l'acier:
tendue: σs = 434,8 (MPa)
comprimée: σs' = 123,8 (MPa)

Cas ELS **Mmax = 162,94 (kN*m)** **Mmin = -280,00 (kN*m)**
Coefficient de sécurité: 1,39
Position de l'axe neutre: y = 12,0 (cm)
Bras de levier: Z = 31,0 (cm)
Contrainte maxi du béton:σb = 12,5 (MPa)
Contrainte limite: 0,6 fcj = 18,0 (MPa)
Contrainte de l'acier:
tendue: σs = 358,5 (MPa)
comprimée: σs' = 108,9 (MPa)
Contrainte limite de l'acier:
ss lim = 500,0 (MPa)

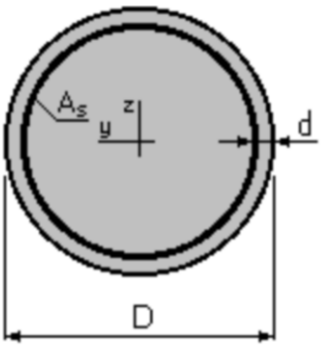
Calcul de Section en Flexion Déviée Composée

1. Hypothčses:

Béton: fc28 = 27,0 (MPa) Acier: fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration très préjudiciable
- Prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



D = 120,0 (cm)

d = 5,0 (cm)

3. Efforts appliqués:

Cas N^{O}	Type	N (kN)	My (kN*m)	Mz (kN*m)
1.	ELU	559,20	360,10	134,10
2.	ELA	333,50	104,80	0,00

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique As = 113,1 (cm2)

Section minimum As min = 113,1 (cm2) Section maximum As max = 565,5 (cm2)

théorique ρ = 1,00 (%)

minimum ρ_{min} = 0,50 (%) maximum ρ_{max} = 5,00 (%)

Analyse par Cas:

Cas NO 1: Type ELU N = 559,20 (kN) My = 360,10 (kN*m) Mz = 134,10 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 8,91 Pivot: B

Position de l'axe neutre: y = 54,6 (cm)

Bras de levier: Z = 89,3 (cm)

Déformation du béton: εb = 3,50 (‰)

Déformation de l'acier: εs = 3,87 (‰)

Contrainte de l'acier:

tendue: σs =434,8 (MPa)

comprimée: σs' = 434,8 (MPa)

Cas NO 2: Type ELA N = 333,50 (kN) My = 104,80 (kN*m) Mz = 0,00 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 7,41 Pivot: C

Position de l'axe neutre: y = 144,0 (cm)

Bras de levier: Z = 55,5 (cm)

Déformation du béton: εb = 3,11 (‰)

Déformation de l'acier: εs = 0,00 (‰)

Contrainte de l'acier:

comprimée: σs' = 500,0 (MPa)

ANNEXE E
Analyse dynamique

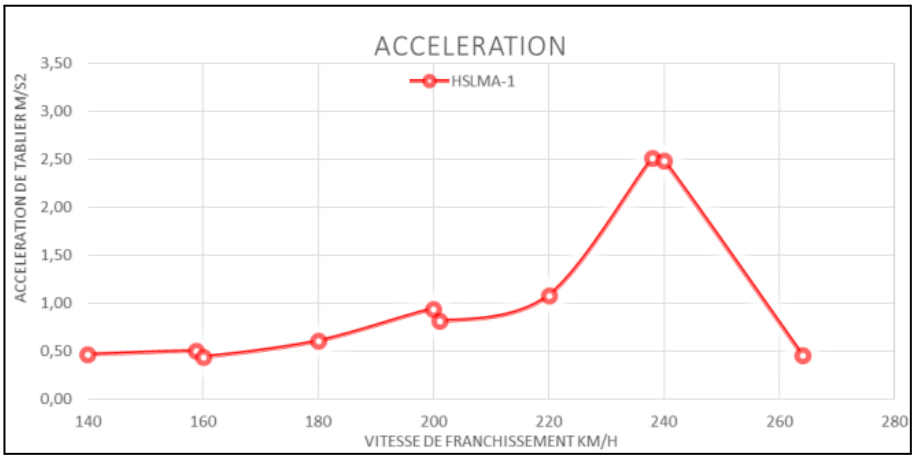


Figure: accélération du convoi A1

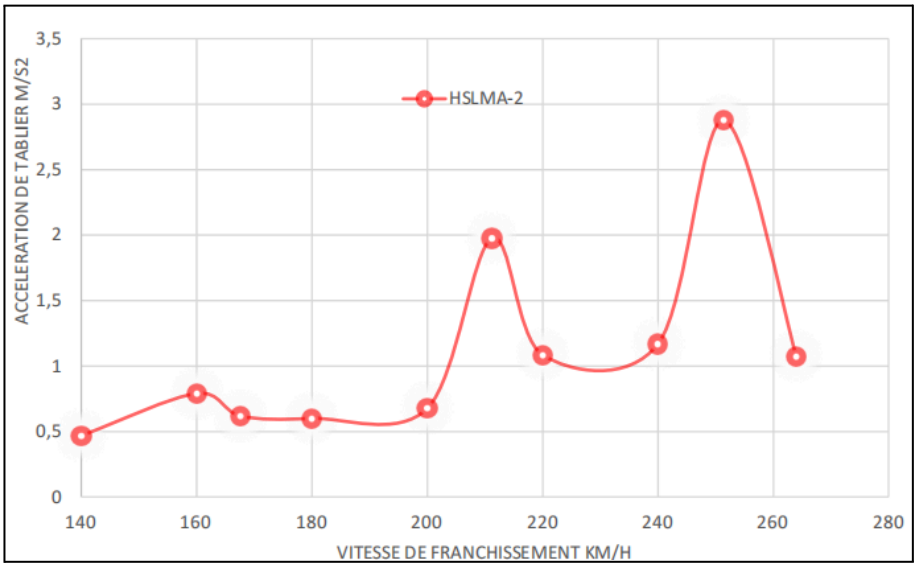


Figure: accélération du convoi A2

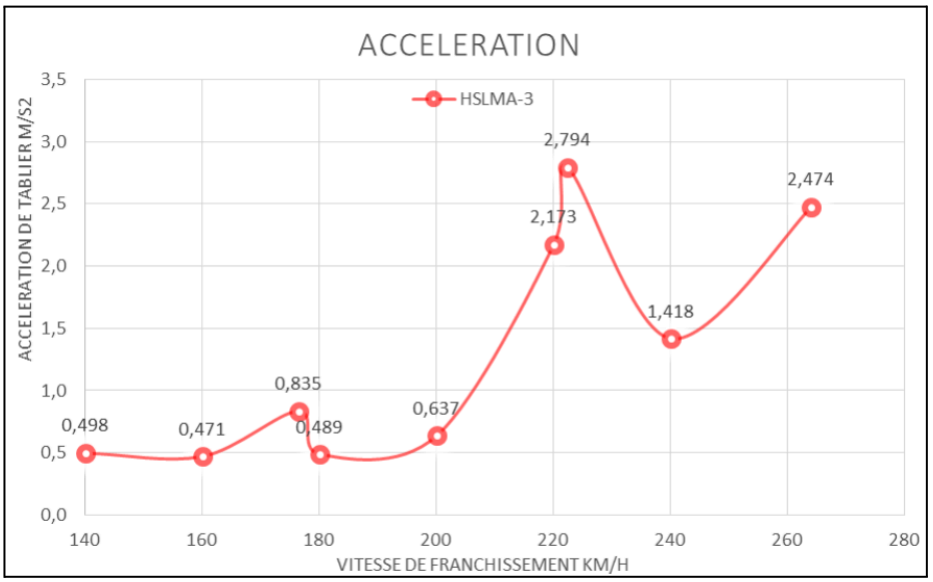


Figure: accélération du convoi A3

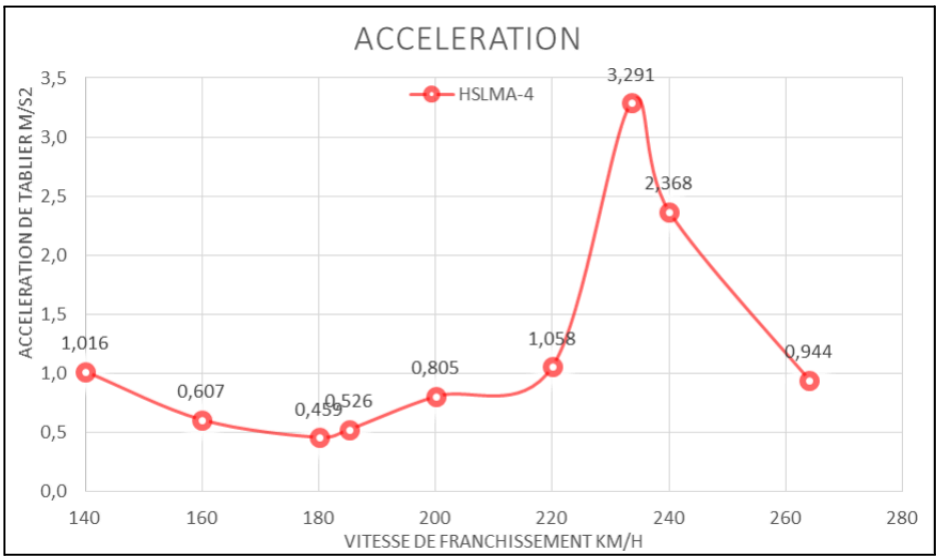


Figure: accélération du convoi A4

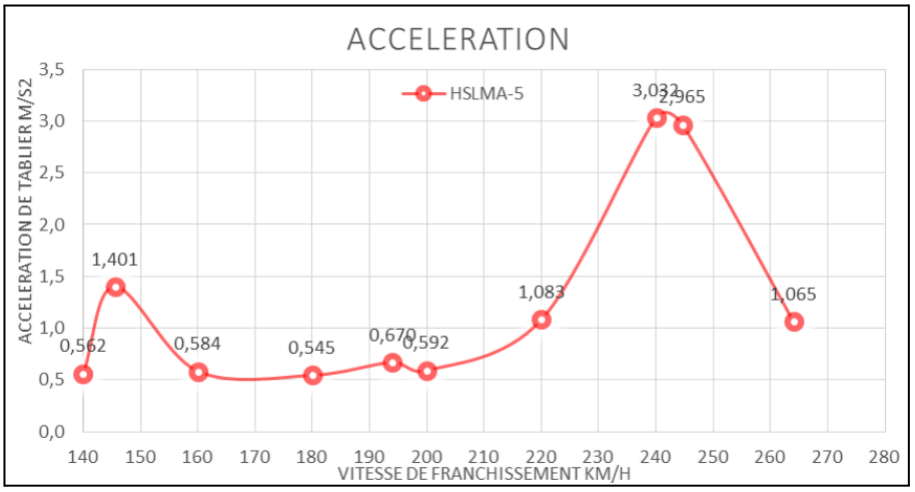


Figure: accélération du convoi A5

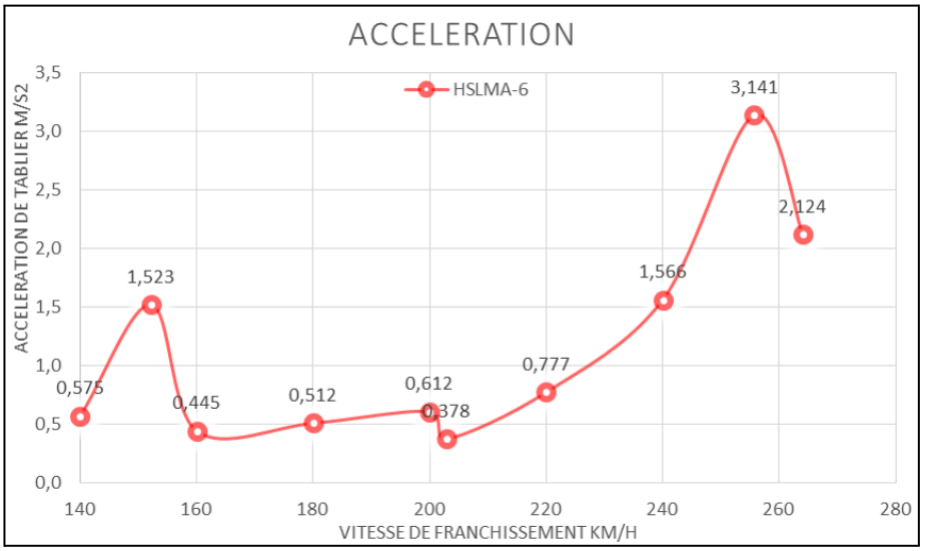


Figure: accélération du convoi A6

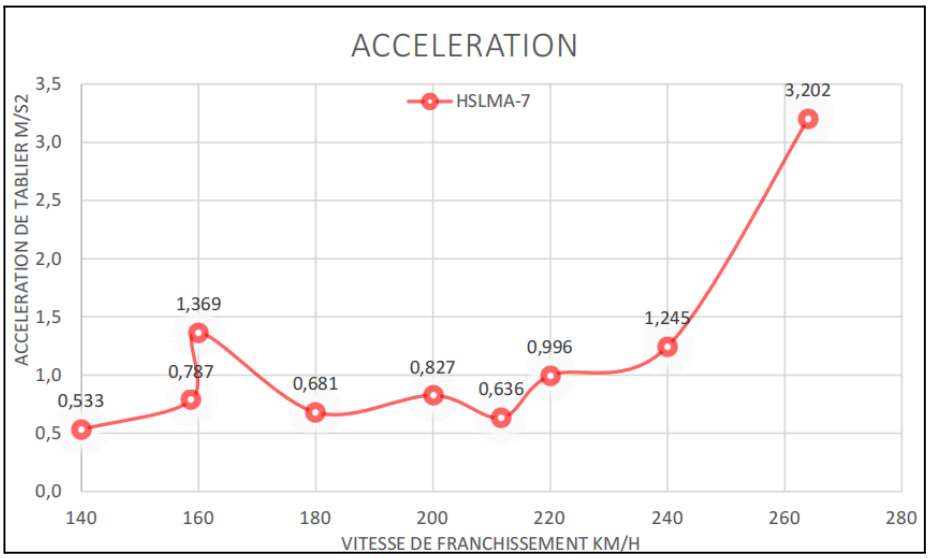


Figure: accélération du convoi A7

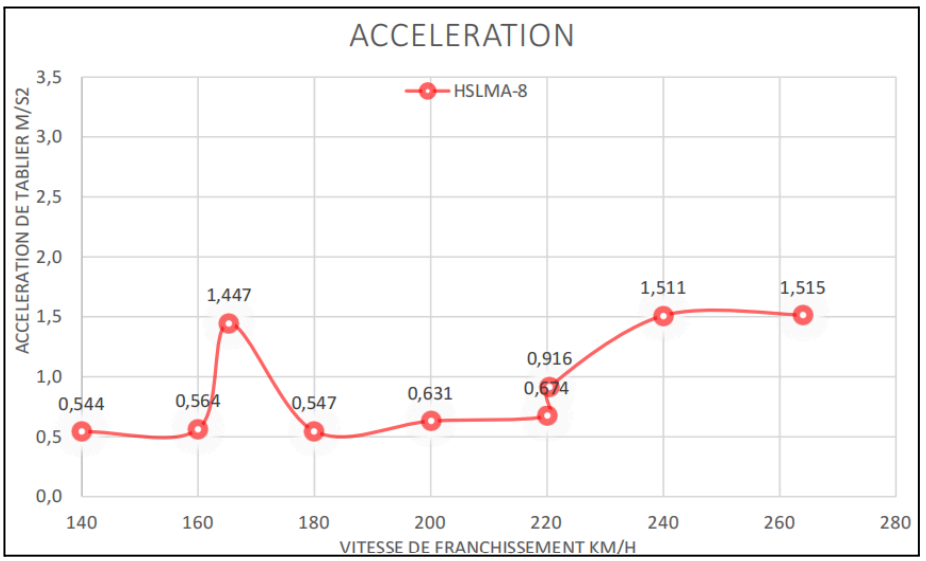


Figure: accélération du convoi A8

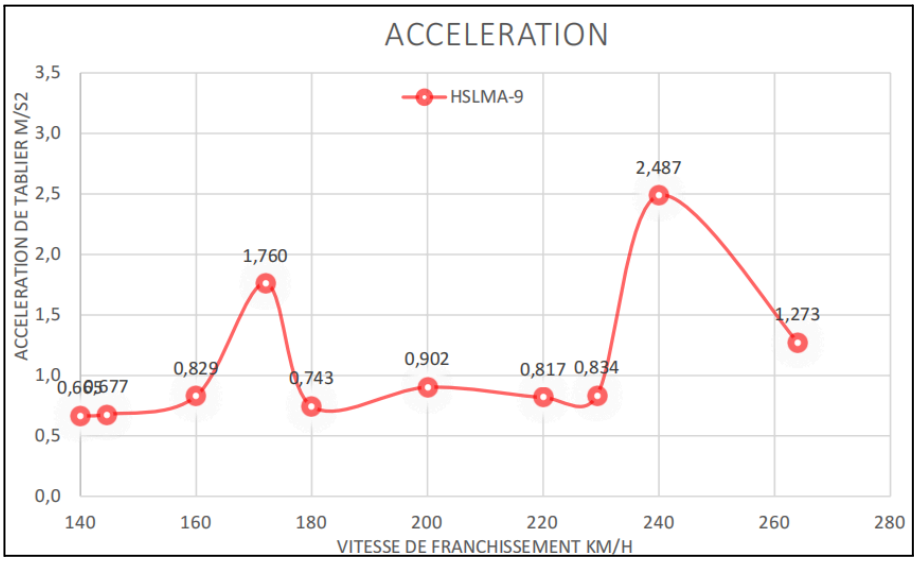


Figure: accélération du convoi A9

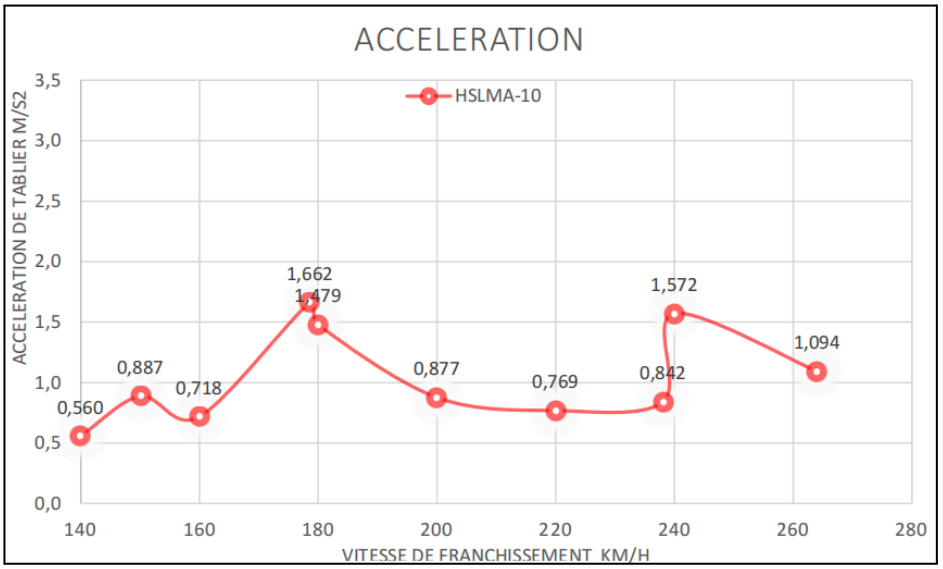


Figure: accélération du convoi A10

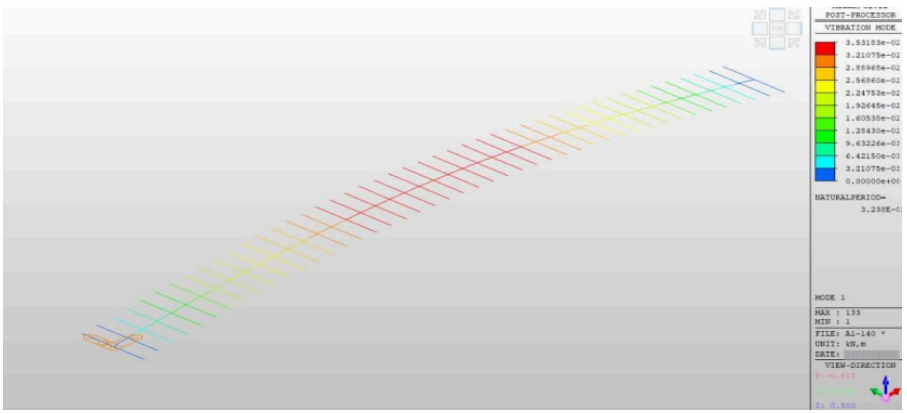


Figure: premier mode propre

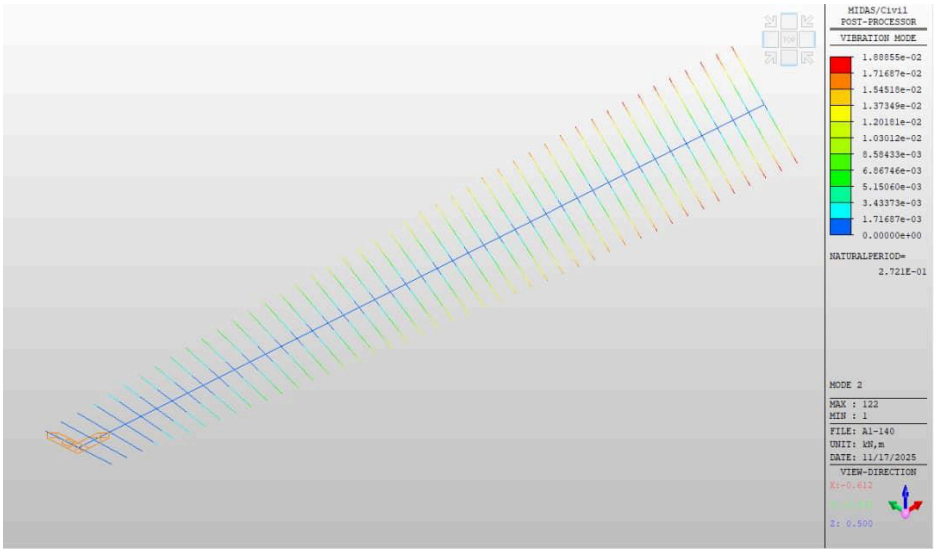


Figure: deuxième mode propre

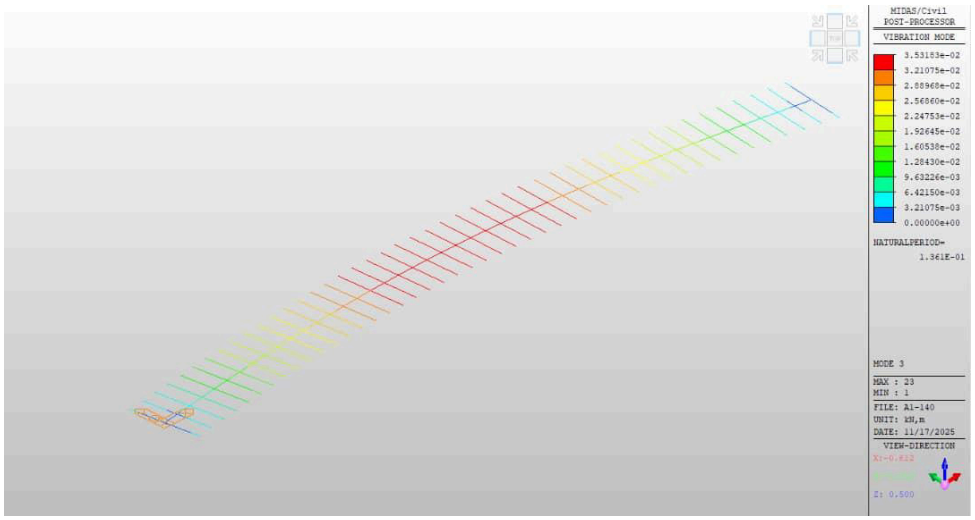


Figure: troisième mode propre

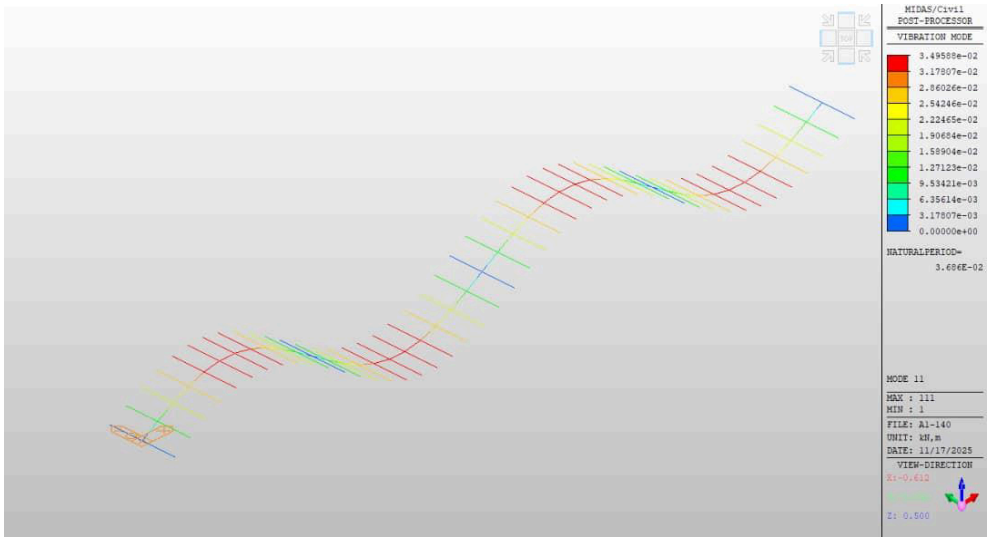


Figure: 11 ème mode propre