République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المـــدرســـة الوطنيـــة العليـــا للأشغال العموميـة
فرنسـيس جانســون
École Nationale Supérieure des Travaux Publics
Francis Jeanson

Mémoire

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

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Infrastructures de Base

Thème

Étude d'une infrastructure ferroviaire pour l'installation d'une caténaire 25 kV, 50 Hz Projet : « Électrification de la banlieue d'Alger »

Présenté par :

KOUBA Fatma Zohra

Encadré par :

M. RACHEDI Lamine

M^me^ MEDELCI-CHIALI Soumiya

Promotion 2019 / 2020

© ENSTP-FJ – Garidi – Vieux Kouba

Remerciements

Au nom d'Allah, le tout miséricordieux, le très miséricordieux

Je commence tout d'abord par remercier الله le tout puissant, clément et miséricordieux, qui m'a donnée la force, le courage et la volonté pour entamer et accomplir ce modeste travail.

Je tiens à remercier en premier lieu mes encadreurs, M. Lamine RACHEDI et M^{me} Soumiya MEDELCI-CHIALI, pour toute la confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant la responsabilité de l'encadrement de mon projet de fin d'études. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie en particulier, M. CHOUGUI et M. REHAMNIA, pour leur accueil chaleureux au sein de la Société Technique de l'Ingénierie du Rail, et leur gentillesse. Mes plus vifs remerciements vont à M. Youcef BABAKHOYA, M^{me} Meriem LECHEHEB et M. LEKSASSI, pour leur précieuse aide.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des enseignants de l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics, en particulier M. MORSLI, M. Douadi RAHMANI et M. BENREDOUANE, qui ont marqué mon cursus.

Enfin, mes vifs remerciements sont également adressés aux membres de l'honorable jury pour l'intérêt qu'ils ont porté pour présider et examiner ce modeste travail.

À mes chers parents,

mon cher frère et mes chères sœurs,

mes meilleurs amis et à toutes les personnes qui m'ont soutenue

ملخص

في إطار سعينا للحصول على شهادة مهندس دولة في الأشغال العمومية، اخترنا كموضوع لمذكرتنا هندسة السكك الحديدية، حيث عملنا على دراسة البنية التحتية لسكة حديدية من أجل تزويدها بالتيار الكهربائي بنظام 25kv, 50Hz لضواحي الجزائر العاصمة، والذي اقترحته شركة الدراسات التقنية والهندسة للسكة الحديدية.

يهدف عملنا المتواضع إلى إظهار أهمية مهندس الأشغال العمومية ودوره في العمل على انشاء سكة حديدية كهربائية. يعتمد عملنا على ثلاثة محاور رئيسية تمثلت في جمع البيانات والمعلومات العامة عن البنية التحتية لسكة حديدية وكهربت هذه الأخيرة، بالإضافة الى البيانات العامة المتعلقة بمنطقة الدراسة (الأرصاد الجوية والجيوتقنية) وتوضيح احتياجات المشروع وتحديد أبعاده. بعد ذلك، قمنا بدراسة جيومترية لمواقع الدعائم الكهربائية.

عقب ذلك مباشرة استكملنا جميع عمليات التحقق من الدعائم الكهربائية والقاعدات الأساسية لها. وفي آخر المطاف ختمنا عملنا بدراسة التأثير البيئي للمشروع وفقًا للإطار القانوني الجزائري نظرا لاعتبار هذا الهيكل القاعدي منشأ دخيل على بيئة المنطقة.

في سياق أخر وضمن سعينا للحصول على درجة الماستر، فقد تم تخصيص فصل كامل لموضوع البحث الخاص بتأثير ارتفاع سرعة السكة الحديدية على البيئة وبالأخص على السكان المجاورين لها. حيث سلطنا الضوء على أكثر الأضرار انتشارا واقتراح حلول للحد أو التقليل منها.

كلمات مفتاحية: البنية التحتية، سكة حديدية، كابل كهربائي، دعائم كهربائية.

Résumé

Dans le cadre de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Travaux Publics, nous avons choisi l'ingénierie ferroviaire comme thème pour notre projet de fin d'études.

Nous avons travaillé sur l'étude d'une infrastructure ferroviaire pour l'installation d'une caténaire 25Kv, 50Hz, de la banlieue Algéroise, proposée par la Société d'Études Techniques et de l'Ingénierie du Rail.

Ce modeste travail avait pour objectif de montrer l'importance et le rôle d'un ingénieur en travaux publics dans l'électrification d'une ligne ferroviaire. Nous avons commencé le travail par la collecte des données et informations générales sur l'infrastructure ferroviaire et l'électrification de celle-ci, suivie par la collecte de données générales relatives à la zone d'étude (météorologique et géotechnique) et l'élaboration des besoins du projet. Ensuite, nous avons étudié géométriquement l'emplacement des supports de la caténaire, autrement dit, le piquetage. Puis, nous avons dimensionné ces supports et leurs fondations.

Notre travail a été conclu par une étude d'impact sur l'environnement conforme au cadre juridique algérien, et ce, afin de tenir en compte de l'effet de la construction et exploitation d'une ligne ferroviaire électrifiée sur son environnement.

En parallèle, pour l'obtention du diplôme de Master, un chapitre a été consacré à une recherche portant sur les impacts de l'augmentation de la vitesse ferroviaire sur l'environnement, en particulier, sur la population riveraine. Nous avons exposé, à travers cela, les impacts les plus répandus et proposé des solutions pour les réduire.

Mots clés : Infrastructure, ligne ferroviaire, caténaire, support caténaire.

Abstract

As part of the obtention of our State Engineer Degree in Public Works, we chose railway engineering as theme of our diploma thesis.

We worked on the study of a rail infrastructure for the installation of a catenary 25Kv, 50Hz, in the suburbs of Algiers, which was proposed by the Company of Technical Studies and Rail Engineering.

This modest work aims to show the importance and role of a public works engineer in the electrification of a railway line. We started the work by collecting general data and information on railway infrastructure and electrification thereof, followed by collecting general data relating to the study area (meteorological and geotechnical) and developing the needs of the project. Then, we geometrically studied the location of the catenary supports, in other words, picketing. Then we sized these supports and their foundations.

Our work was concluded with an environmental impact study in accordance with the Algerian legal framework, in order to take into consideration the effect of the construction and operation of an electrified railway line on its environment.

At the same time, for the graduation of the Master's degree, a chapter was devoted to research on the impacts of the increase in rail speed on the environment, in particular on the local population. We have exposed, through this, the most widespread impacts and propose solutions to reduce them.

Key words: Infrastructure, railway, catenary, catenary' support.

Liste des figures

CHAPITRE MASTER : IMPACTS DE L'AUGMENTATION DE LA VITESSE FERROVIAIRE SUR L'ENVIRONNEMENT 2

Figure M.1. Histogramme représentant le coût de construction par kilomètre en millions d'euros en fonction de la ville 4

Figure M.2. Histogramme représentant le réseau LGV dans le monde (la longueur en fonction de la vitesse) 5

Figure M.3. Émissions comparées de GES d'un train à grande vitesse et d'un camion (pour une tonne transportée) 6

Figure M.4. Émissions (en gCO_2) pour un voyageur parcourant 1km (comparatif selon le mode de transport utilisé) 6

Figure M.5. Émission de particules par les modes de transport en France 7

Figure M.6. Courbe de pondération A 8

Figure M.7. Échelle de bruit en décibel (dB) 9

Figure M.8. Échelle de bruit ferroviaire 9

Figure M.9. Vibrations au contact roue/rail 10

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE 15

Figure I.1. Infrastructure ferroviaire 15

Figure I.2. Constituants de la voie 16

Figure I.3. Traverses mono-bloc et bi-bloc en béton 16

Figure I.4. Ballast le long de la voie ferrée 16

Figure I.5. Branchement simple et Traversée jonction double 17

Figure I.6. Pont rail en maçonnerie et tunnel ferroviaire 17

Figure I.7. Poste d'aiguillage de la gare de Rennes, France 18

Figure I.8. Signalisation ferroviaire latérale moderne 19

Figure I.9. Système de traction électrique 19

Figure I.10. Caténaire 20

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉLECTRIFICATION D'UNE LIGNE FERROVIAIRE 21

Figure II.1. Système d'électrification 2×25kV 50Hz 23

Figure II.2. Schéma simplifié d'une sous-station et ses équipements 23

Figure II.3. Sous-station de traction électrique 24

Figure II.4. Les éléments de la caténaire 25

Figure II.5. Console caténaire 25

Figure II.6. Appareil tendeur muni d'un contre poids 26

Figure II.7. Bureau de surveillance dans le système SCADA 27

CHAPITRE III : PRÉSENTATION DU PROJET ET COLLECTE DES DONNÉES .. 28
Figure III.1. Situation de la zone de projet sur une carte Google Earth 28
Figure III.2. Implantation du tronçon étudié sur Google Earth 29
Figure III.3. Contour de référence du gabarit cinétique type GC – UIC 505-1 . 30
Figure III.4. Profil du fil de contact rainuré de 107 mm² de section 31
Figure III.5. Carte de zonage sismique du territoire national 32
CHAPITRE IV : ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE, AVANT-PROJET DE PIQUETAGE 34
Figure IV.1. SAS de la gare de Rouiba 34
Figure IV.2. Désaxement en voie principale 37
Figure IV.3. Désaxement en voie de service 37
Figure IV.4. Désaxement en courbe 37
Figure IV.5. La portée en raccordement parabolique 41
Figure IV.6. Changement de la hauteur du F.C en fonction de la pente 42
Figure IV.7. Position des supports par rapport au passage supérieur 42
Figure IV.8. Branchement sur V.P 43
Figure IV.9. Position des supports par rapport à une voie souterraine 43
Figure IV.10. Distances normalisées entre les pendules (Norme SNTF) 46
CHAPITRE V : DIMENSIONNEMENT DES SUPPORTS DE LA CATÉNAIRE..... 47
Figure V.1. Orientation du support 49
Figure V.2. Schéma explicatif de l'application de la tension radiale 51
Figure V.3. Modèle du support avec les charges appliquées (ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS) 53
Figure V.4. Section HE 55
Figure V.5. Poteau avec 02 consoles 59
Figure V.6. Efforts appliqués sur les 02 consoles 63
Figure V.7. Schéma du portique simplifié 70
Figure V.8. Distribution de la charge sismique 72
Figure V.9. Modèle de calcul du portique 22m d'ouverture 73
Figure V.10. Tableau de vérification de la résistance des poteaux (ROBOT S.A) 74
Figure V.11. Résultat des vérifications de la section vis-à-vis des instabilités (ROBOT S.A) 74
CHAPITRE VI : DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS 76
Figure VI.1. Une platine type avec 02 tiges d'ancrage 77
Figure VI.2. Schéma d'une tige d'ancrage 78
Figure VI.3. Coupe transversale de la fondation cylindrique 79

Figure VI.4. Dimensions d'une fondation cylindrique 80
Figure VI.5. Pressions latérales P1 et P2 81
Figure VI.6. Schéma de ferraillage d'une fondation de Ø80cm avec 8 barres et 12barres 83
Figure VI.7. Schéma de ferraillage d'une fondation de Ø100cm avec 16 barres 83
Figure VI.8. Fondation d'ancrage 83
Figure VI.9. Pressions latérales pour une fondation d'ancrage 84
CHAPITRE VII : ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT 86
Figure VII.1. Localisation de la zone du projet 87
ANNEXE A : ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE, AVANT-PROJET DE PIQUETAGE 92
Figure A.1. Charges appliquées en courbe 93
Figure A.2. Perte de charge en courbe (Expansion) 94
Figure A.3. Perte de charge en courbe (Push-off) 94
Figure A.4. Charge en courbe avec les angles 95
Figure A.5. Schéma détaillé d'un branchement sur voie principale 95
Figure A.6. Isolateur double entrée 96
Figure A.7. Isolateur à grande vitesse 96
ANNEXE B : SECTIONNEMENT ET PENDULAGE 109
Figure B.1. Répartition des pendules sur une portée 109
Figure B.2. Pendulage type en coupe longitudinale 110
Figure B.3. Pendulage d'une portée de 45m en coupe longitudinale 110
Figure B.4. Pendulage d'une portée de 40.5m en coupe longitudinale 111
Figure B.5. Pendules 111
ANNEXE C : DIMENSIONNEMENT DES SUPPORTS DE LA CATÉNAIRE 114
Figure C.1. Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées (classification d'âme) 114
Figure C.2. Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées (classification de semelle) 115
Figure C.3. Courbes de flambement (EC3) 116
Figure C.4. Choix de la courbe de flambement selon les sections transversales 116
Figure C.5. Organigramme de calcul du coefficient de réduction χ 117
Figure C.6. Schéma statique du support HEA 240 117
Figure C.7. Moment fléchissant à l'ELS du support HEA 240 118
Figure C.8. Effort normal et effort tranchant à l'ELS du support HEA240 118

Figure C.9. Tableau des efforts internes à l'ELS du support HEA 240 118
Figure C.10. Moment fléchissant à l'ELU du support HEA 240 119
Figure C.11. Effort normal et effort tranchant à l'ELU du support HEA240 .. 119
Figure C.12. Tableau des efforts internes à l'ELU du support HEA 240 119
Figure C.13. Moment fléchissant max à l'ELU (M_z : G+R+1.2Ey) 120
Figure C.14. Moment fléchissant max à l'ELU (M_y : G+R+1.2Ex) 120
Figure C.15. Effort tranchant max à l'ELU (Fx : 1.35G+1.35R+1.5Qx)..... 120
Figure C.16. Effort normal max à l'ELU (Fz : G+R+1.2Ex)..... 121
Figure C.17. Moment fléchissant max à l'ELS (M_z : G+R+Ey)..... 121
Figure C.18. Moment fléchissant max à l'ELS (M_Y : G+R+Ex) 121
Figure C.20. Effort tranchant max à l'ELS (Fx : G+R+Ex)..... 122
Figure C.21. Effort normal max à l'ELS (Fz : G+R+Ex) 122
Figure C.22. Tableau des efforts internes à l'ELU combinaison N°1..... 122
Figure C.23. Tableau des efforts internes à l'ELU combinaison N°2..... 123
Figure C.24. Tableau des efforts internes à l'ELU combinaison N°3..... 123
Figure C.25. Tableau des efforts internes à l'ELU combinaison N°4..... 123
Figure C.26. Tableau des efforts internes à l'ELS combinaison N°1 124
Figure C.27. Tableau des efforts internes à l'ELS combinaison N°2 124
Figure C.28. Tableau des efforts internes à l'ELS combinaison N°3 124
Figure C.29. Tableau des efforts internes à l'ELS combinaison N°4 125

Liste des tableaux

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉLECTRIFICATION D'UNE LIGNE FERROVIAIRE 21

Tableau II.1. Tensions électriques standards pour l'électrification ferroviaire 21

Tableau II.2. Avantages et inconvénients des deux tensions principales 22

CHAPITRE III : PRÉSENTATION DU PROJET ET COLLECTE DES DONNÉES .. 28

Tableau III.1. Caractéristiques du tracé en plan de la ligne 30

Tableau III.2. Caractéristiques du pantographe 31

Tableau III.3. Coefficient d'accélération de la zone A 32

Tableau III.4. Données du sol 33

CHAPITRE IV : ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE, AVANT-PROJET DE PIQUETAGE 34

Tableau IV.1. Portée maximale et minimale selon la norme 36

Tableau IV.2. Pentes maximales du fil de contact lors des changements de hauteur 41

CHAPITRE V : DIMENSIONNEMENT DES SUPPORTS DE LA CATÉNAIRE..... 47

Tableau V.1. Conditions climatiques du projet..... 47

Tableau V.2. Caractéristiques des caténaires..... 47

Tableau V.3. Charges permanentes..... 48

Tableau V.4. Poids des câbles..... 50

Tableau V.5. Tension radiale pour chaque câble 51

Tableau V.6. Charge de vent pour chaque câble..... 52

Tableau V.7. Efforts appliqués sur le support et les câbles 53

Tableau V.8. Flèche en tête de support dues aux charges permanentes 54

Tableau V.9. Flèche au niveau du fil de contact due aux charges de vent 55

Tableau V.10. Valeurs de la contre flèche en fonction de la flèche 55

Tableau V.11. Désaxements et hauteur de la caténaire pour le support avec 02 consoles..... 60

Tableau V.12. Charges permanentes et climatiques de support et les 02 consoles 60

Tableau V.13. Efforts appliqués sur le support et les 02 consoles..... 60

Tableau V.14. Flèches dues aux charges permanentes et aux charges de vent..... 61

Tableau V.15. Paramètres de vérification de flexion simple (support avec 02 consoles) 61

Tableau V.16. Paramètres de vérification de flambement (support avec 02 consoles) 62

Tableau V.17. Paramètres de vérification de déversement (support avec 02 consoles) 62

Tableau V.18. Valeurs des forces et moments de torsion (Support avec 02 consoles) 63
Tableau V.19. Données de calcul pour le support d'ancrage..... 64
Tableau V.20. Charges permanentes et climatiques de support d'ancrage HEA 260 65
Tableau V.21. Efforts appliqués sur le support d'ancrage HEA 260..... 65
Tableau V.22. Flèches due aux charges permanentes et aux charges de vent 66
Tableau V.23. Paramètres de vérification de flexion simple (support d'ancrage). 66
Tableau V.24. Paramètres de vérification de flambement (support d'ancrage)..... 67
Tableau V.25. Paramètres de vérification de déversement (support d'ancrage) ... 67
Tableau V.26. Récapitulatif des charges appliquées sur le portique 72
Tableau V.27. Efforts internes maximaux à l'ELU (portique 22m) 73
Tableau V.28. Efforts internes maximaux à l'ELS (portique 22m)..... 73
CHAPITRE VI : DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS 76
Tableau VI.1. Hypothèses géotechniques 76
Tableau VI.2. Caractéristiques du béton utilisé pour les fondations 76
Tableau VI.3. Détermination du diamètre des tiges d'ancrage pour chaque type de support..... 78
Tableau VI.4. Vérification des tiges d'ancrage pour chaque type de support 79
Tableau VI.5. Récapitulatif des dimensions de fondation pour chaque type de support..... 82
Tableau VI.6. Armatures longitudinales et transversales des fondations cylindriques 82
CHAPITRE VII : ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT 86
Tableau VII.1. Impacts et mesures de prévention et d'atténuation en phase de construction..... 88
Tableau VII.2. Impacts et mesures de prévention et d'atténuation en phase d'exploitation 89
ANNEXE A : ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE, AVANT-PROJET DE PIQUETAGE 92
Tableau A.1. Portées en courbe à l'exclusion des clothoïdes 92
Tableau A.2. Valeurs des paramètres d'un branchement sur V.P $\leq \mathbf{160}\ \boldsymbol{Km/h}$. 96
ANNEXE B : SECTIONNEMENT ET PENDULAGE 109
Tableau B.1. Longueur des pendules et distance entre eux en fonction de la portée 109
ANNEXE C : DIMENSIONNEMENT DES SUPPORTS DE LA CATÉNAIRE 114
Tableau C.1. Valeurs du paramètres d'imperfection 115
Tableau C.2. Coefficient d'accélération de zone 125

Tableau C.3. Valeurs du coefficient $\boldsymbol{CT}$ 125
Tableau C.4. Valeurs de la période caractéristique $\boldsymbol{T2}$ 125
Tableau C.5. Valeurs de ξ (%) 126
Tableau C.6. Valeurs du coefficient de comportement R 126
ANNEXE D : DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS 131
Tableau D.1. Section de fondations 131

Annotations

CDPA : Câble De Protection Aérien

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique

DTR : Document Technique Règlementaire

EN : European Norm

ELS : État Limite de Service

ELU : État Limite Ultime

FLIRT : Fast Light Innovation Regional Train (une gamme d'automotrice à fortes performances)

GES : Gaz à Effet de Serre

$I_{y,z}$: Moment d'inertie

I_t : Moment d'inertie de torsion

I_w : Facteur de gauchissement

M_{sd} : Moment fléchissant sollicitant de calcul

$M_{pl,(y,z)}$: Moment résistant plastique de la section

M_{cr} : Moment critique de déversement

N_{sd} : Effort normal sollicitant de calcul

Pk : Point Kilométrique

RNV : Règlement Neige et Vent

SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition (Système de contrôle et d'acquisition des données)

SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer français

UIC : Union International des Chemins de fer

V_{sd} : Effort tranchant sollicitant de calcul

α : Facteur d'imperfection pour le flambement (alpha)

$\lambda_{y,z}$: Élancement géométrique pour le mode de flambement (lambda)

$\overline{\lambda_{y,z}}$: Élancement réduit pour le mode de flambement (lambda)

λ_{cr} : Élancement critique d'Euler (lambda)

$\chi_{y,z}$: Coefficient de réduction pour le mode de flambement considéré (khi)

γ_d^{max} : Poids volumique sec maximal (gamma)

γ_d^{min} : Poids volumique sec minimal (gamma)

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

CHAPITRE MASTER : IMPACTS DE L'AUGMENTATION DE LA VITESSE FERROVIAIRE SUR L'ENVIRONNEMENT 2

M.1. INTRODUCTION 2

M.2. PROBLÉMATIQUE 2

M.3. LIGNE FERROVIAIRE À GRANDE VITESSE "LGV" 2

M.3.1. Définition 2

M.3.2. Spécificités techniques d'une LGV 2

M.3.2.1. Voie 2

M.3.2.2. Ouvrages d'art 3

M.3.2.3. Type de trafic autorisé 3

M.3.2.4. Caténaire 3

M.3.2.5. Signalisation 3

M.3.2.6. Coût 3

M.3.3. Réseau LGV, aujourd'hui 4

M.4. IMPACTS POSITIFS DE LA LGV SUR L'ENVIRONNEMENT 5

M.4.1. Moins d'émissions de gaz à effet de serre 5

M.4.2. Efficacité environnementale en termes d'émission de $CO2$ 6

M.4.3. Émissions limitées de particules 6

M.4.4. Moindre consommation d'énergie 7

M.5. IMPACTS NÉGATIFS D'UNE LGV SUR L'ENVIRONNEMENT 7

M.5.1. Bruit d'une LGV et population riveraine 7

M.5.1.1. Définition du bruit 7

M.5.1.2. Échelle de bruit 8

M.5.1.3. Effets du bruit d'une LGV sur la santé 9

M.5.1.3.1. Effets directs 9

M.5.1.3.2. Effets indirects 10

M.5.1.4. Sources du bruit d'une LGV 10

M.5.1.4.1. Bruit dû au roulement (contact roue/rail) 10

M.5.1.4.2. Autres sources du bruit d'une LGV 11

M.5.1.5. Bruit et règlementation Algérienne 11

M.5.1.6. Traitement du bruit d'une LGV 12

M.5.1.6.1. Actions d'atténuation 12

M.5.1.6.2. Actions de protection 13

M.5.1.6.3. Actions complémentaires pour protéger les riverains le long d'une LGV 13

M.6. CONCLUSION 13
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE 15
I.1. INTRODUCTION 15
I.2. DEFINTION D'UNE INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE 15
I.3. COMPOSANTES D'UNE INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE 15
I.3.1. Voies 15
I.3.1.1. Rails 15
I.3.1.2. Traverses 16
I.3.1.3. Ballast 16
I.3.1.4. Appareil de voie 17
I.3.2. Plate-forme et Ouvrages d'art 17
I.3.3. Signalisation ferroviaire 18
I.3.3.1. Postes d'aiguillage 18
I.3.3.2. Systèmes de détection des trains 18
I.3.3.3. Signalisation classique ou latérale 18
I.3.4. Installations électriques de traction 19
I.3.4.1. Sous-station d'alimentation 19
I.3.4.2. Télécommande 20
I.3.4.3. Caténaires 20
I.4. CONCLUSION 20
CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉLECTRIFICATION D'UNE LIGNE FERROVIAIRE 21
II.1. INTRODUCTION 21
II.2. SYSTÈME D'ÉLECTRIFICATION FERROVIAIRE 21
II.2.1. Sous-station 21
II.2.1.1. Tensions utilisées 21
II.2.1.2. Equipements des sous-stations 23
II.2.1.3. Mode de fonctionnement des sous-stations 24
II.2.2. Sous système caténaire 24
II.2.2.1. Éléments de la caténaire 25
II.2.3. Sous système SCADA 26
II.3. ÉTAPES DE L'ÉLECTRIFICATION FERROVIAIRE 27
II.4. CONCLUSION 27
CHAPITRE III : PRÉSENTATION DU PROJET ET COLLECTE DES DONNÉES .. 28
III.1. INTRODUCTION 28
III.2. PRÉSENTATION ET OBJECTIFS DU PROJET 28
III.3. CHOIX DE LA GARE 29

III.3.1. Situation et description de la gare de Rouiba 29
III.4. COLLECTE DES DONNÉES 29
III.4.1. Données sur la ligne ferroviaire 29
III.4.1.1. Tracé en plan 30
III.4.1.2. Gabarit du matériel roulant 30
III.4.1.3. Pantographe 30
III.4.2. Données sur la caténaire 31
III.4.2.1. Composition 31
III.4.2.2. Performances 31
III.4.3. Données météorologiques 32
III.4.3.1. Climat et température 32
III.4.3.2. Vent 32
III.4.4. Données Sismiques 32
III.4.5. Données physiques 33
III.4.5.1. Caractéristiques géotechniques 33
III.5. CONCLUSION 33
CHAPITRE IV : ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE, AVANT-PROJET DE PIQUETAGE 34
IV.1. INTRODUCTION 34
IV.2. DÉFINITION 34
IV.3. CRITÈRES DU PROJET 34
IV.3.1. Schéma d'alimentation et de sectionnement 34
IV.3.2. Ouvrages d'art 35
IV.3.3. Zones particulières 35
IV.3.4. Schéma de signalisation 35
IV.4. RÈGLES ET NORMES UTILISÉES 35
IV.4.1. Règles de piquetage 35
IV.4.2. Normes utilisées 36
IV.5. LONGUEUR DU CANTON DE POSE 36
IV.6. DÉTÈRMINATION DES PORTÉES 36
IV.6.1. Paramètres nécessaires pour la détermination des portées 37
IV.6.1.1. Désaxement 37
IV.6.1.2. Balancement latéral théorique du pantographe 38
IV.6.1.2.1. En alignement et en courbe avec dévers ≤ 66mm 38
IV.6.1.2.2. En alignement et en courbe avec dévers > 66mm 38
IV.6.1.3. Flèche de la courbe en milieu de portée 38
IV.6.1.4. Désaxement du fil de contact en milieu de portée 38
IV.6.1.5. Déplacement du fil de contact 39

IV.6.1.5.1. Pression dynamique du vent sur le fil 39
IV.6.1.5.2. Déplacement maximum du fil de contact sous l'action du vent 39
IV.6.1.5.3. Déplacement maximum du fil de contact en tenant compte du désaxement aux supports encadrant (en alignement) 39
IV.6.2. Détermination de la portée maximale 40
IV.6.2.1. En alignement 40
IV.6.2.2. En courbe 40
IV.6.3. Portée en raccordement parabolique ou clothoïde 40
IV.6.4. Raccordement en pentes 41
IV.6.5. Portées et position des supports aux abords des points singuliers du projet 42
IV.6.5.1. Passage Supérieur 42
IV.6.5.2. Branchement sur la voie principale 43
IV.6.5.3. Voies de canalisations (gaz, eau, électricité) 43
IV.6.5.4. Traversées électriques aériennes 43
IV.6.5.5. Bâtiments voyageurs et les gares 44
IV.6.5.6. Isolateur de section 44
IV.7. IMPLANTATION DES SUPPORTS 44
IV.8. PRINCIPES D'ÉQUIPEMENT EN 25 KV 44
IV.8.1. Équipement tendeur "E.T" 44
IV.8.2. Sectionnements 45
IV.8.2.1. Sectionnements à lame d'air 45
IV.8.2.2. Isolateur de section 45
IV.9. PENDULAGE 45
IV.10. MISE SUR PLAN DE L'AVANT-PROJET DE PIQUETAGE 46
IV.11. CONCLUSION 46
CHAPITRE V : DIMENSIONNEMENT DES SUPPORTS DE LA CATÉNAIRE 47
V.1. INTRODUCTION 47
V.2. NORMES ET RÈGLES DE CALCUL 47
V.3. PARAMÈTRES ET HYPOTHÈSES DE CALCUL 47
V.3.1. Paramètres climatiques 47
V.3.2. Caractéristiques des caténaires 47
V.3.3. Caractéristiques du matériau "Acier" 47
V.3.4. Paramètres sismiques 48
V.4. DÉFINITION DES CHARGES 48
V.4.1. Charges permanentes 48
V.4.2. Charges variables climatiques 48
V.4.3. Charges sismiques 48

V.5. MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT 49
V.6. DIMENSIONNEMENT D'UN SUPPORT INDÉPENDANT 49
V.6.1. Support avec une seule console 49
V.6.1.1. Orientation du support 49
V.6.1.2. Évaluation des charges 49
V.6.1.2.1. Charges permanentes 50
V.6.1.2.2. Charges climatiques 51
V.6.1.2.3. Charges sismiques 52
V.6.1.3. Combinaisons de charges 52
V.6.1.4. Vérification des déplacements 54
V.6.1.4.1. Flèches en tête de support dues aux charges permanentes 54
V.6.1.4.2. Flèche au niveau du fil de contact dû aux charges de vent 54
V.6.1.4.3. Contre flèche 55
V.6.1.5. Classification de la section 55
V.6.1.6. Vérification de la résistance du support 56
V.6.1.7. Vérification de la résistance du support vis-à-vis du flambement 56
V.6.1.8. Vérification de la résistance du support au déversement 57
V.6.1.9. Vérification de la résistance du support au voilement par cisaillement 58
V.6.1.10. Taux de travail du support 58
V.6.2. Support avec deux consoles 59
V.6.2.1. Évaluation des charges 60
V.6.2.1.1. Charges permanentes et charges climatiques 60
V.6.2.2. Vérification des déplacements 61
V.6.2.3. Vérification de la résistance du support 61
V.6.2.4. Vérification de la résistance du support vis-à-vis du flambement 62
V.6.2.5. Vérification de la résistance du support au déversement 62
V.6.2.6. Vérification de la résistance du support au voilement par cisaillement 62
V.6.2.7. Vérification du risque de vrillage des supports 62
V.6.2.8. Taux de travail du support 64
V.6.3. Support d'ancrage 64
V.6.3.1. Évaluation des charges 64
V.6.3.1.1. Charges permanentes et charges climatiques 65
V.6.3.2. Vérification des déplacements 66
V.6.3.3. Vérification de la résistance du support 66
V.6.3.4. Vérification de la résistance du support vis-à-vis du flambement 67
V.6.3.5. Vérification de la résistance du support au déversement 67
V.6.3.6. Vérification de la résistance du support au voilement par cisaillement 67

V.6.3.7. Taux de travail du support 67
V.7. PLAN D'AFFECTATION DES SUPPORTS INDÉPENDANTS 67
V.8. DIMENSIONNEMENT ET ÉTUDE D'UN PORTIQUE RIGIDE 69
V.8.1. Évaluation des charges 69
V.8.1.1. Charges permanentes 69
V.8.1.1.1. Poids du poteau 69
V.8.1.1.2. Poids de la poutre 69
V.8.1.1.3. Poids de la chaise 70
V.8.1.1.4. Poids des câbles et armement 70
V.8.1.1.5. Tensions radiales 70
V.8.1.2. Charges climatiques 70
V.8.1.3. Charges sismiques 70
V.8.1.3.1. Distribution de la résultante des forces sismiques selon la hauteur 71
V.8.2. Modélisation 72
V.8.3. Combinaisons de charges 72
V.8.4. Résultats 73
V.8.5. Vérification de la résistance des poteaux 74
V.9. CONCLUSION 75
CHAPITRE VI : DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS 76
VI.1. INTRODUCTION 76
VI.2. HYPOTHÈSES DE CALCUL 76
VI.2.1. Hypothèses géotechniques 76
VI.2.2. Caractéristiques des matériaux 76
VI.3. ASSEMBLAGE DES PIEDS DE SUPPORTS ENCASTRÉS 76
VI.3.1. Dimensionnement de la platine 76
VI.3.1.1. Choix des cordons de soudures 77
VI.3.1.2. Épaisseur de la platine 77
VI.3.1.3. Vérification de la résistance de la platine 78
VI.3.2. Dimensionnement des tiges d'encrages 78
VI.3.2.1. Vérification des tiges d'ancrage 78
VI.4. CHOIX DE TYPE DE FONDATION 79
VI.5. MÉTHODE DE CALCUL DES FONDATIONS 79
VI.5.1. Fondations des supports indépendants 80
VI.5.1.1. Détermination du moment maximum en tête de fondation 80
VI.5.1.2. Vérification de la pression latérale 80
VI.5.1.3. Ferraillage 82
VI.5.2. Fondation d'ancrage 83

VI.5.2.1. Détermination de la force d'arrachement 83
VI.5.2.2. Vérification de la pression latérale 84
VI.5.2.3. Ferraillage 84
VI.6. CONCLUSION 85
CHAPITRE VII : ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT 86
VII.1. INTRODUCTION 86
VII.2. CADRE JURIDIQUE 86
VII.3. DESCRIPTION DU PROJET 86
VII.4. DÉLIMITATION ET ÉTAT INITIAL DE LA ZONE 87
VII.5. PHASES DE PROJET 87
VII.6. IMPACTS ET MESURES DE PRÉVENTION, D'ATTÉNUATION OU DE COMPENSATION 88
VII.6.1. Phase de construction 88
VII.6.2. Phase d'exploitation 89
VII.7. CONCLUSION 89
CONCLUSION GÉNÉRALE 90
BIBLIOGRAPHIE 91
ANNEXE A : ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE, AVANT-PROJET DE PIQUETAGE 92
A.1. INTRODUCTION 92
A.2. LES PORTÉES EN COURBE 92
A.3. CALCUL DE LONGUEUR DE CANTON 92
A.3.1. Critère de déplacement des contrepoids 92
A.3.2. Critère de perte due à la rotation des consoles 93
A.3.2.1. Description du phénomène 93
A.4. VALEURS DES PARAMÈTRES D'UN BRANCHEMENT 95
A.4. TYPES DES ISOLATEURS DE SECTION 96
A.4.1. Isolateur double entrée 96
A.4.2. Isolateur à masse concentrée 96
A.4.3. Isolateur à grande vitesse 96
ANNEXE B : SECTIONNEMENT ET PENDULAGE 109
B.1. INTRODUCTION 109
B.2. PENDULAGE 109
ANNEXE C : DIMENSIONNEMENT DES SUPPORTS DE LA CATÉNAIRE 114
C.1. INTRODUCTION 114
C.2. CLASSIFICATION DE LA SECTION 114
C.3. PARAMÈTRES DU FLAMBEMENT 115
C.3.1. Facteur d'imperfection $\boldsymbol{\alpha}$ 115

C.3.2. Courbes de flambement 116
C.3.3. Choix de la courbe de flambement en fonction de la section 116
C.3.4. Calcul du coefficient de réduction χ 117
C.4. MODÉLISATION ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS 117
C.4.1. Support avec une seule console, section HEA 240 117
C.4.2. Portique avec une ouverture de 22m 120
C.5. PARAMÈTRES DE CALCUL SISMIQUE 125
C.5.1. Coefficient d'accélération de zone 125
C.5.2. Coefficient CT 125
C.5.3. Période caractéristique $T2$ 125
C.5.4. Pourcentage d'amortissement critique 126
C.5.5. Coefficient de comportement global de la structure R 126
C.6. NOTES DE CALCUL DES SUPPORTS 126
ANNEXE D : DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS 131
D.1. INTRODUCTION 131
D.2. GAMME DES FONDATIONS CYLINDRIQUES SELON UIC/ORE 131
D.3. FERRAILLAGE AVEC ROBOT EXPERT 131
D.3.1. Ferraillage de la fondation pour le support HEM 300 (calcul en Flexion Composée) 131
D.3.2. Ferraillage de la fondation pour le support HEA 240 (calcul en Flexion Simple) 132
D.3.3. Ferraillage de la fondation pour le support HEB 240 (calcul en Flexion Simple) 133
D.3.4. Ferraillage de la fondation pour le support HEA 260 (calcul en Flexion Simple) 134



INTRODUCTION GÉNÉRALE



INTRODUCTION GÉNÉRALE

La réalisation d'une infrastructure ferroviaire, ses équipements, l'électrification de ces voies, constituent un ensemble d'opérations complexes, difficiles et coûteuses, mais passionnantes, car faisant appel à un travail d'équipe pluridisciplinaire.

Le développement du matériel roulant, le recours à la traction électrique ainsi que l'utilisation des longs rails soudés, sont des catalyseurs de l'augmentation de la vitesse ferroviaire et la naissance des lignes à grandes vitesses "LGV" ; Ces dernières ont des impacts (positifs/ négatifs) sur l'environnement et en particulier sur la population riveraine. C'est pour cela que nous consacrons le volet master du présent mémoire aux impacts de l'augmentation de la vitesse ferroviaire sur l'environnement.

Le thème de ce projet de fin d'études est l'étude d'une infrastructure ferroviaire pour l'installation d'une caténaire 25 kV, 50 Hz sur le projet "Électrification de la banlieue d'Alger", en particulier, la gare de "Rouiba", qui a été proposé par la Société Technique de l'Ingénierie de Rail. Ce projet est intégré dans le programme de renforcement et de modernisation du réseau ferroviaire Algérien proposé par l'état dans le but de développer l'économie du pays après la crise des années 1990, cela nous a motivés pour travailler sur un tel projet.

Ce thème vise à montrer l'importance de la partie Génie Civil dans l'électrification d'une ligne ferroviaire qui nécessite une étude particulière.

À travers ce travail, nous avons consacré les deux premiers chapitres à l'énumération de généralités se rapportant à l'infrastructure ferroviaire et à l'électrification d'une ligne ferroviaire.

Le troisième chapitre comporte la collecte des données de base et l'établissement des besoins du projet. Le quatrième chapitre porte sur l'étude de l'avant-projet de piquetage où l'on étudie géométriquement l'emplacement des supports de la caténaire. Les cinquième et sixième chapitres ont été respectivement consacrés au dimensionnement des supports de la caténaire et leurs fondations.

Pour conclure notre travail, nous avons consacré le septième chapitre à l'étude d'impact du projet sur l'environnement.

CHAPITRE MASTER

"Impacts de l'augmentation de la vitesse ferroviaire sur l'environnement"

CHAPITRE MASTER : IMPACTS DE L'AUGMENTATION DE LA VITESSE FERROVIAIRE SUR L'ENVIRONNEMENT

M.1. INTRODUCTION

Ce chapitre consiste en une revue bibliographique qui porte sur les effets de l'augmentation de la vitesse ferroviaire et leurs impacts sur l'environnement. Nous y traiterons principalement les impacts sur la population riveraine et tenterons de les évaluer et de trouver des solutions réductrices et/ou compensatrices.

M.2. PROBLÉMATIQUE

Le développement durable nous conduit à combiner plusieurs objectifs, et c'est parfois bien difficile. Et pour cause, il faut satisfaire à des exigences globales, planétaires, et des exigences locales, de vie quotidienne, avec parfois des contradictions, dont il faut sortir « par le haut ».

Les chemins de fer sont un moyen de transport respectueux de l'environnement bien adapté à la société moderne ; Avec l'apparition de la traction électrique, l'augmentation de la vitesse ferroviaire jusqu'à 350km/h est désormais possible. Ce qui a fait intégrer les lignes à grandes vitesses "LGV/TGV" dans une stratégie durable d'aménagement du territoire tant à l'échelle globale que locale ; Cependant, comme pour toute infrastructure de transports, la réalisation d'une LGV engendre forcément des impacts sur l'environnement, à l'échelle locale cette fois-ci et sur la qualité de vie des riverains.

Les impacts négatifs d'une LGV sur l'environnement, et en particulier sur la population riveraine illustrent parfaitement les contradictions qu'il faut affronter.

M.3. LIGNE FERROVIAIRE À GRANDE VITESSE "LGV"

M.3.1. Définition

Une ligne à grande vitesse, ou LGV, est une ligne ferroviaire construite spécialement pour permettre la circulation de trains à grande vitesse, tel qu'on l'entend généralement en France et actuellement en Algérie.

Toutefois, selon la définition de l'UIC employée dans la plupart des autres pays, cela comprend les nouvelles lignes construites pour une vitesse d'au moins 250 km/h, mais aussi les lignes existantes adaptées à une vitesse d'au moins 200 km/h, voire 220 km/h, utilisées par des trains spécialement conçus pour la grande vitesse, et même les nouvelles lignes d'accès aux LGV, notamment en Espagne (1).

M.3.2. Spécificités techniques d'une LGV

M.3.2.1. Voie

La vitesse impose des contraintes géométriques au tracé des voies. En raison de l'augmentation de l'effet centrifuge avec la vitesse, le rayon minimal des courbes est élevé, en fonction des vitesses visées. Ce rayon minimal va de 2 500 m à 6 000 m pour des lignes récentes ou futures prévues pour des vitesses de l'ordre de 350 km/h.

Selon le terrain les tracés sont le plus rectilignes possibles avec des courbes de plus grand rayon.

Le profil en long (rampes et pentes) peut être aussi sévère que celui des lignes de montagne. L'énergie cinétique emmagasinée par les trains à grande vitesse et leur puissance massique très élevée leur permettent de monter des rampes très fortes sans trop pénaliser leur consommation électrique. La déclivité maximale est égale à 35‰ selon l'UIC.

La voie doit être normale (écartement égale à 1.435 m) ou large, car la voie métrique ou étroite ne permet pas d'atteindre 200 km/h en service courant.

M.3.2.2. Ouvrages d'art

Les ouvrages d'art nécessitent des calculs adaptés aux vitesses pratiquées (effets dynamiques plus importants).

Si elles comportent des tunnels, la section de ceux-ci doit être surdimensionnée, en particulier aux extrémités, pour limiter les effets de la pression aérodynamique.

M.3.2.3. Type de trafic autorisé

Une LGV est le plus souvent dédiée au déplacement à grande vitesse des voyageurs et du courrier. Un trafic mixte voyageurs et marchandises entraîne des contraintes fortes. Le débit possible d'une ligne diminue fortement si les trains circulent avec des vitesses très différentes (300 et 200 km/h ; 300 et 160 km/h).

Le croisement de trains à grande vitesse et de trains de marchandises « tout venant » n'est guère envisageable en raison des risques de déstabilisation de chargements par effet de souffle. Aussi, les trains de marchandises ne peuvent circuler que pendant les périodes de fermeture au trafic à grande vitesse, la nuit par exemple. Mais ces périodes sont utilisées pour l'entretien de l'infrastructure.

M.3.2.4. Caténaire

Les LGV sont électrifiées à tension monophasée élevée 25 kV, 50 ou 60 Hz ; ou 15 kV, 16 2/3 Hz.

Les caténaires sont plus tendues que celles des lignes classiques, afin que la vitesse de propagation de l'onde mécanique (ondulation du fil de contact de la caténaire provoquée par le contact du pantographe) reste supérieure à la vitesse du train. En effet, si le train allait plus vite que l'onde, on aurait une accumulation de la déformation en avant du pantographe, ou mur de la caténaire, un phénomène qui provoquerait une rupture de la caténaire.

M.3.2.5. Signalisation

Les LGV sont équipées de systèmes de signalisation avec transmission d'informations sol-train, ils comportent un renvoi en cabine des informations sur la vitesse à respecter, la présence de coupez-courant…, et comportent un contrôle de la vitesse, soit continu par palier, soit avec calcul de courbes de freinage.

M.3.2.6. Coût

Compte tenu de leurs caractéristiques techniques, la construction de lignes ferroviaires à grande vitesse représente un investissement relativement lourd.

Le prix au kilomètre est fonction de divers paramètres :

- Le relief des zones à traverser ;
- Les ouvrages d'art à construire ;
- Les communications à rétablir (notamment routières) ;
- Le type de ligne envisagé (réservée aux circulations à grande vitesse ou mixte voyageurs/fret) ;
- L'insertion dans le paysage et le respect des réglementations locales en matière d'environnement.

→ **Exemples sur les coûts d'une LGV**

- **En France**

Le graphe suivant est une présentation d'une étude statistique sur le coût de construction par kilomètre des lignes à grande vitesse (LGV) en France en 2014 (en millions d'euros). Elle montre que la construction de la ligne à grande vitesse Méditerranée, qui lie les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon, a couté environ 20 millions d'euros par kilomètre (2).

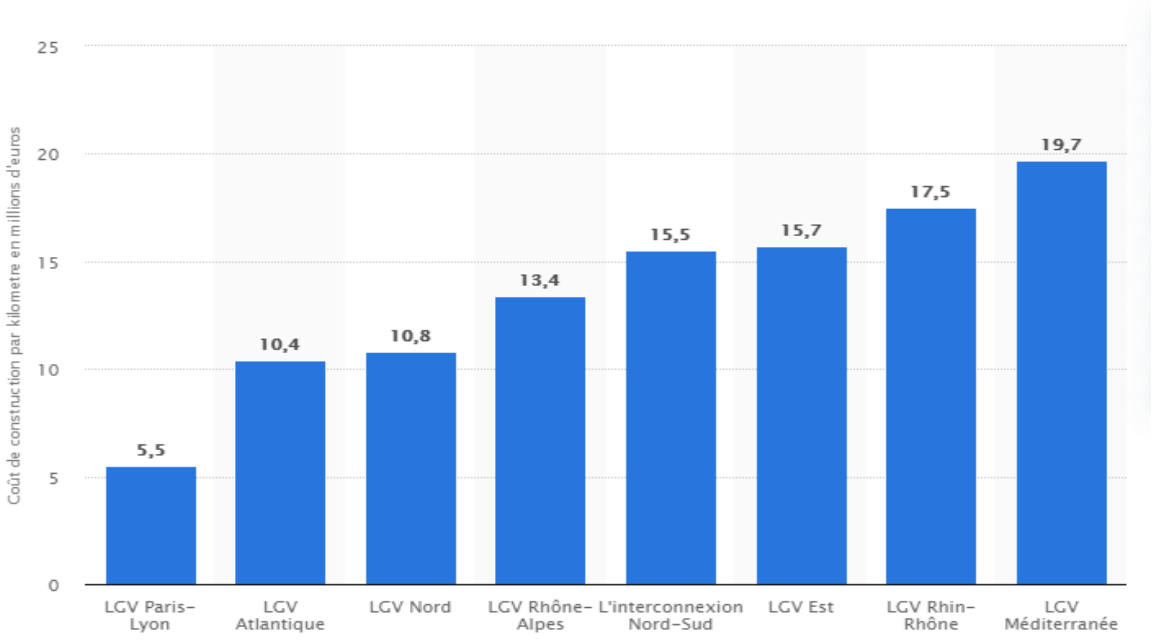


Figure M.1. Histogramme représentant le coût de construction par kilomètre en millions d'euros en fonction de la ville

- **Au Royaume-Uni**

Le coût de construction de la ligne à grande vitesse HS2 (high speed 2), qui doit améliorer la liaison entre Londres et le nord de l'Angleterre, a dépassé les 118 milliards d'euros. Cette ligne devrait rentrer en service progressivement entre 2026 et 2033 (2).

M.3.3. Réseau LGV, aujourd'hui

Le réseau à grande vitesse a commencé son développement en 1964 au Japon. Son extension, principalement motivée par le Japon, la France, l'Espagne, l'Italie et l'Allemagne, était lent jusqu'en 2000. À ce stade, une accélération pourrait se faire sentir, mais ce n'est qu'en 2008 que, grâce à un investissement lourd de la Chine, le réseau a changé de dimension.

Aujourd'hui plus de la moitié de toutes les lignes à grande vitesse se trouvent en Asie.

Il est à noter que toutes les lignes à grande vitesse ne fonctionnent pas à la même vitesse. Plusieurs facteurs entrent en jeu dans l'explication.

- Premièrement, il y a la distinction entre la vitesse de conception et la vitesse de fonctionnement. Les lignes les plus récentes sont conçues pour rouler à 350 km/h (voire 400 km/h), c'est-à-dire que l'infrastructure et la superstructure peuvent résister à cette vitesse. Cependant, la vitesse commerciale maximale (vitesse opérationnelle) peut être inférieure à la vitesse de conception car le matériel roulant ne lui convient pas. La vitesse opérationnelle est déterminée par le processus de certification au cours duquel la preuve doit être apportée que le matériel roulant peut rouler avec succès sur la ligne à la vitesse visée plus 10% ;
- Deuxièmement, certaines lignes dites à grande vitesse sont conçues pour des vitesses inférieures à 250 km / h. Cela peut être dû au mélange de trafic ou à la cohérence du réseau. Si l'infrastructure doit être exploitée par des trains de marchandises et de voyageurs ou par des trains longue distance et régionaux, la capacité de la ligne est augmentée en réduisant la vitesse maximale. En outre, certaines lignes sont parfois construites principalement pour assurer la cohérence des réseaux, par exemple en reliant différentes sections. Dans ce cas, la vitesse maximale peut être inférieure.

Le résultat est que le réseau mondial à grande vitesse n'est pas homogène en termes de vitesse (1).

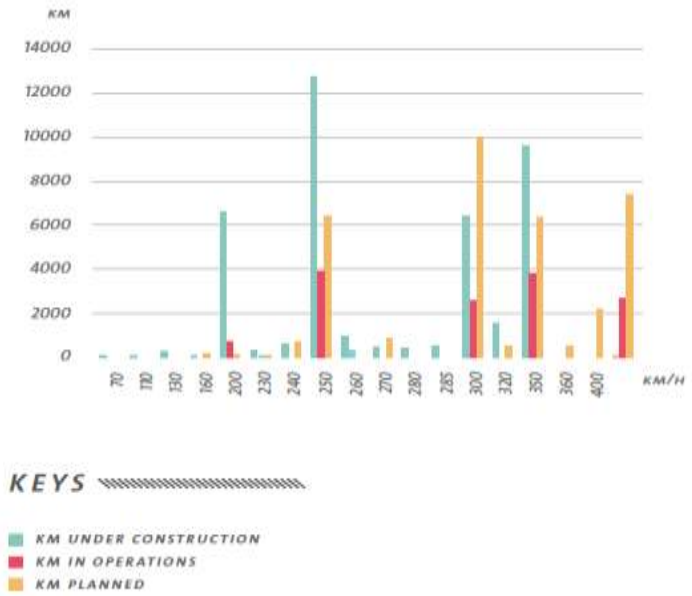


Figure M.2. Histogramme représentant le réseau LGV dans le monde (la longueur en fonction de la vitesse)

M.4. IMPACTS POSITIFS DE LA LGV SUR L'ENVIRONNEMENT

En plus de ses performances qui sont élevées face à des critères de durabilité, une ligne à grande vitesse est un atout majeur pour l'environnement, pour les raisons suivantes :

M.4.1. Moins d'émissions de gaz à effet de serre

Les trains à grande vitesse contribuent d'une manière significative à réduire la production de gaz à effet de serre. Le secteur des transports est responsable de 30 % des émissions de gaz à effet de serre (GES), d'après une étude statistique faite en France en 2018.

Pour une tonne de marchandises transportées, un train à grande vitesse émet 6,18 gCO_2/t.km contre 86,7 gCO_2/t.km pour un camion (3).



Figure M.3. Émissions comparées de GES d'un train à grande vitesse et d'un camion (pour une tonne transportée)

M.4.2. Efficacité environnementale en termes d'émission de CO_2

Le rendement mécanique du rail, ainsi que le recours massif à l'énergie électrique (notamment si elle est d'origine renouvelable) limitent l'empreinte environnementale du chemin de fer.

Que ce soit pour des trajets longue distance ou pour des transports urbains ou interurbains, les émissions de CO_2 par kilomètre parcouru sont systématiquement beaucoup plus faibles pour une LGV.



Figure M.4. Émissions (en gCO2) pour un voyageur parcourant 1km (comparatif selon le mode de transport utilisé)

M.4.3. Émissions limitées de particules

Des dizaines de milliers de décès prématurés sont à déplorer chaque année du fait de la pollution de l'air aux particules très fines PM 2.5 (particules dont le diamètre est inférieur à 2.5 microns), soit 9 % de la mortalité annuelle totale (source Agence Santé Publique France). La pollution de l'air est la première préoccupation environnementale au niveau mondial.

D'après une étude statistique menée en Avril 2017 par CITEPA (Paris), environ 19 % des particules sont imputables au secteur des transports. Dans celui-ci, le mode routier représente plus de 80 % des émissions, quel que soit le type de particules, et le transport ferroviaire 2,5 %.

Il est donc moins polluant que les autres types de transport. De plus, pour une ligne à grande vitesse, le pourcentage de ces particules diminue jusqu'à 2%.

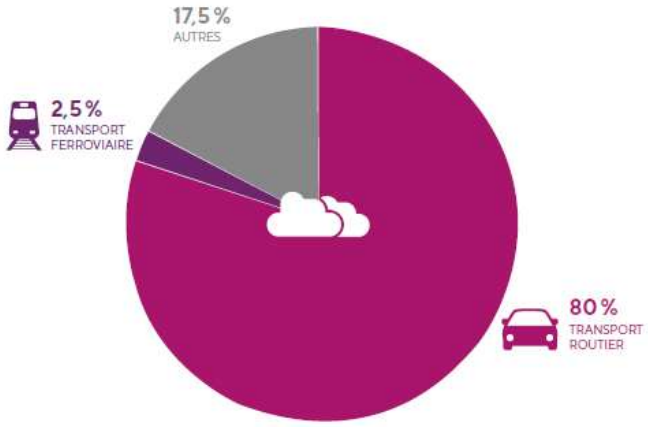


Figure M.5. Émission de particules par modes de transport en France

M.4.4. Moindre consommation d'énergie

D'un point de vue énergétique, le chemin de fer, et à plus forte raison la LGV, offre un rendement élevé. Le phénomène est mécanique : les roues en acier sur des rails en acier présentent une faible résistance au roulement et dissipent moins d'énergie que les autres modes de transport. Ainsi, le rail utilise l'énergie en moyenne trois fois plus efficacement que la route.

Actuellement, certaines infrastructures et services TGV produisent et consomment leur propre énergie renouvelable. Un exemple innovant est le tunnel ferroviaire de **Schoten** en **Belgique**, principalement conçu pour la protection de la faune dans une zone forestière et pour réduire le bruit du rail et de l'autoroute. L'électricité produite par les panneaux solaires alimente environ 4 000 trains par an. Cela signifie que l'équivalent d'une journée complète de trafic ferroviaire belge peut fonctionner entièrement à l'énergie solaire générée par l'équipement (1).

- Ces raisons montrent qu'il y a une relation amicale entre une ligne ferroviaire à grande vitesse et l'environnement.

M.5. IMPACTS NÉGATIFS D'UNE LGV SUR L'ENVIRONNEMENT

Au-delà des avantages conférés par la LGV en termes d'accroissement des amplitudes horaires et de confort dans les déplacements, il existe des inconvénients, autrement dit, des impacts négatifs sur l'environnement, en particulier sur la population riveraine.

Un des aspects les plus significatifs de l'impact environnemental d'une LGV est **le bruit**. Il est considéré comme la principale nuisance dont la population souffre le plus.

M.5.1. Bruit d'une LGV et population riveraine

M.5.1.1. Définition du bruit

Le bruit est un phénomène physique d'origine mécanique consistant en une variation de pression (très faible), de vitesse vibratoire ou de densité d'un fluide, qui se propage en modifiant progressivement l'état de chaque élément du milieu considéré, donnant ainsi naissance à une onde acoustique.

- Le bruit est caractérisé par trois éléments :

  - **Son intensité** : exprimée en décibels (dB), indique si le bruit est faible, moyen ou fort, (également appelé le niveau sonore) ;

N.B : 1 décibel $= 10\log(\frac{P}{P_{réf}})$; avec P est la pression acoustique et $P_{réf}$ est la pression de référence égale à 20 micropascals.

  - **Sa fréquence** : exprimée en hertz (Hz, nombre de vibrations par seconde), indique si un son est grave ou aigu ;
  - **Sa durée** : correspondant au temps en secondes (s), minutes (m) ou heures (h).

- L'intensité du bruit est mesurée à l'aide d'un sonomètre, appareil qui mesure les sons. Afin de tenir compte de la sensibilité de l'oreille humaine, moins sensible aux basses fréquences, on retient pour les bruits environnementaux une valeur pondérée par fréquence : le décibel "pondéré A" (dB (A)). Cette pondération correspond au filtre de l'oreille humaine.

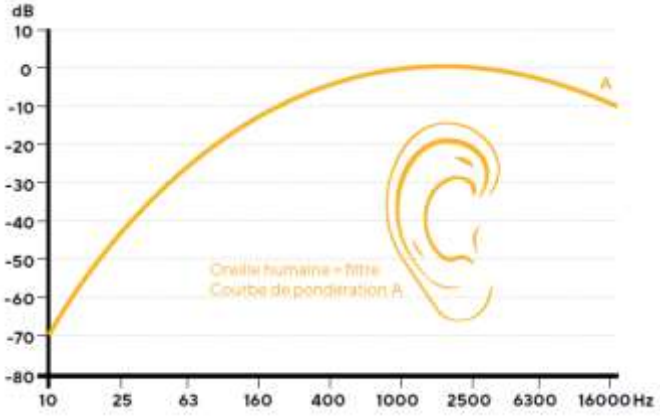


Figure M.6. Courbe de pondération A

- L'addition de niveaux sonores suit des règles particulières éloignées de l'arithmétique habituelle, car le décibel est une unité algorithmique. Pour connaitre le niveau global de bruit émis par plusieurs sources en même temps, les trois règles suivantes s'appliquent :
  - Addition de deux niveaux de bruits égaux : ne fait augmenter le niveau sonore que de 3 dB(A) ;
    Example: 60 dB (A) + 60 dB (A) = 63 dB (A).
  - Addition de deux niveaux de bruit très sensiblement différents (au moins 10 dB (A) d'écart) : le bruit le plus fort masque le bruit le plus faible ;
    Example: 60 dB (A) + 70 dB (A) = 70 dB (A).
  - Addition de dix niveaux de bruit équivalents (10 sources de bruit de même intensité) : fait augmenter le niveau sonore de 10 dB (A).
    Example: 60 dB_1 (A) + 60 dB_2 (A) +… + 60 dB_{10}(A) = 70 dB (A).

Pour récapituler, doubler la source de bruit est loin de doubler le niveau sonore associé.

M.5.1.2. Échelle de bruit

L'échelle utilisée pour mesurer le bruit varie de 0 dB (A), qui correspond au silence complet (en réalité inatteignable : le son se propageant dans l'air, il faudrait être dans une pièce sous

vide ou aller dans l'espace pour obtenir un niveau de bruit de 0 dB (A)), jusqu'à 200 dB (A) ce qui correspond approximativement a une fusée au décollage.

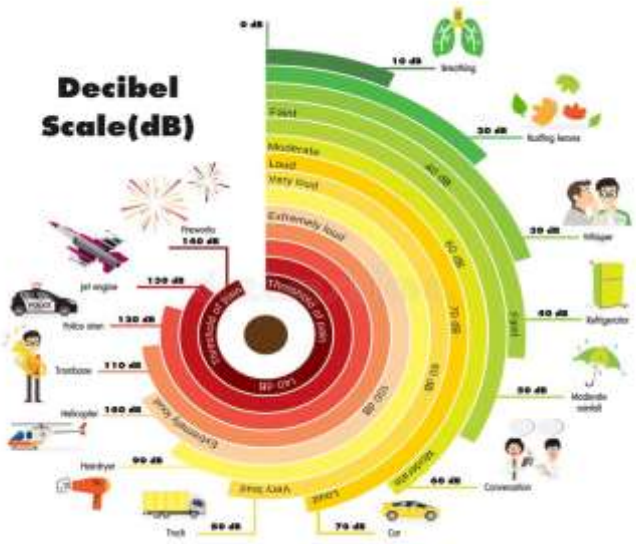


Figure M.7. Échelle de bruit en décibel (dB)

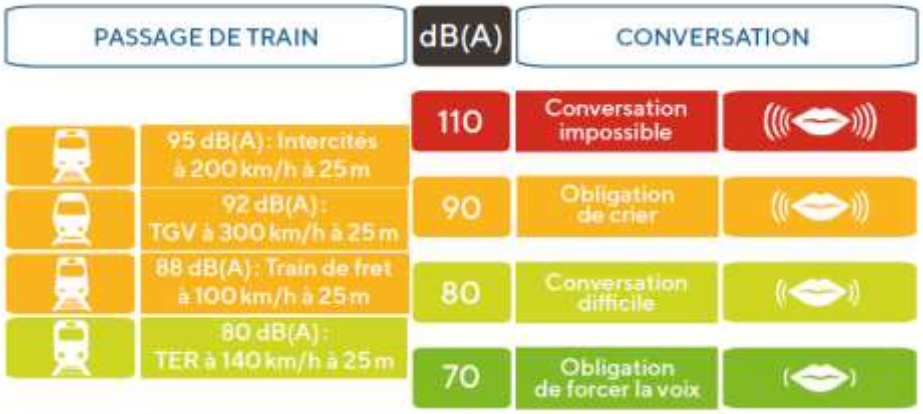


Figure M.8. Échelle de bruit ferroviaire

M.5.1.3. Effets du bruit d'une LGV sur la santé

Plus la vitesse d'un train augmente, plus le bruit devient désagréable et insupportable pour une population riveraine ; Selon l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), le bruit en milieu urbain peut constituer une réelle atteinte à la santé quelle que soit sa source.

Il faut d'abord noter que la population riveraine d'une LGV ne comporte pas que les personnes qui habitent aux alentours de celle-ci, mais aussi les personnes qui travaillent à proximité et qui seront aussi affectées par ses nuisances sonores.

On peut distinguer deux grands types d'effets du bruit d'une LGV :

M.5.1.3.1. Effets directs

Pour ce type d'effets, l'intensité est élevée et la durée du bruit fatigue et lèse l'oreille interne. Dans ce cas, la gêne est instantanée.

M.5.1.3.2. Effets indirects

- **Le bruit favorise le risque d'accident du travail pour plusieurs raisons**
  - le bruit exerce un effet de masque sur les signaux d'alerte ;
  - le bruit perturbe la communication verbale ;
  - le bruit détourne l'attention.
- **Troubles cardiovasculaires**

Selon de nombreuses études, les troubles cardiovasculaires, en particulier l'hypertension, sont plus fréquents chez les travailleurs exposés au bruit. Ils ont tendance à augmenter avec l'ancienneté de ces travailleurs à un poste de travail bruyant. Il semble que ces troubles dépendent également du caractère prévisible ou non du bruit, du type d'activité exercée et d'autres facteurs de stress.

- **Troubles du sommeil**

L'exposition au bruit a des conséquences négatives sur la qualité du sommeil. Par exemple, une exposition diurne de 12 heures à 85 dB(A) provoque une réduction du nombre et de la durée des cycles de sommeil ; si bien que le bruit interfère avec la fonction récupératrice du sommeil et peut entraîner une fatigue chronique. C'est d'autant plus vrai chez les personnes travaillant de nuit et devant dormir pendant la journée.

- **Stress**

Le bruit peut aussi constituer un facteur de stress dans la mesure où il est chronique, imprévisible et incontrôlable. La gêne liée au bruit est aussi associée à l'anxiété, voire à l'agressivité.

→ De ce fait, le bruit ferroviaire peut devenir un enjeu prioritaire lorsque l'exposition de la population aux nuisances sonores risque d'entraîner une dégradation importante de ses conditions de vie et de sa santé.

M.5.1.4. Sources du bruit d'une LGV

Le bruit ferroviaire, en particulier celui d'une LGV, se compose de plusieurs éléments dont l'importance varie selon la vitesse du train.

M.5.1.4.1. Bruit dû au roulement (contact roue/rail)

Il est prédominant entre 60 km/h et 320 km/h.

Il est lié aux défauts de quelques microns (rugosité) sur les surfaces de la roue et du rail qui génèrent des vibrations lors du contact : la roue vibre, des ondes vibratoires sont engendrées dans le rail qui vibre à son tour et transmet, par l'intermédiaire des semelles reliant la traverse au rail, la vibration qui fait résonner les traverses.



Figure M.9. Vibrations dû au contact roue/rail

Le bruit de roulement dépend :

- De la rugosité de la roue ;
- De la rugosité du rail ;
- Du taux de décroissance de l'énergie dans le rail.

Ponctuellement, au freinage ou dans les courbes, des bruits de crissement peuvent s'ajouter.

M.5.1.4.2. Autres sources du bruit d'une LGV

D'autres sources de bruit d'une ligne à grande vitesse existent :

- **Bruit lié à l'effort de traction :** Il provient des moteurs et des ventilateurs ;
- **Bruit des équipements :** prépondérant à l'arrêt, lié aux moteurs, ventilateurs ou climatisation ainsi qu'à l'ouverture et la fermeture des portes ;
- **Bruit aérodynamique** : il est lié à la pénétration dans l'air. Il contribue au bruit global à partir de 250 km/h. Sa contribution est aussi élevée que celle du bruit de roulement.

→ L'émission sonore d'une voie ferrée résulte de l'interaction entre le matériel roulant et l'infrastructure ferroviaire.

M.5.1.5. Bruit et règlementation Algérienne

En Algérie, le problème concernant les nuisances dues aux bruits a été pris en charge par les pouvoirs publics dès 1983 en promulguant la loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement. La réglementation acoustique algérienne actuelle est composée principalement par deux lois, un décret et un DTR :

- **La loi n° 83-03 du 05 février 1983**

Dans cette loi relative à la protection de l'environnement, on trouve dans son chapitre 5, les articles 119, 120 et 121.

Article 119 : Cet article rend responsable toute personne physique ou morale lorsqu'il y a émission de bruits susceptibles de causer une gêne excessive à autrui.

Article 120 : Cet article oblige les responsables de bruits gênants à mettre en œuvre toutes les dispositions utiles pour les supprimer.

Article 121 : Cet article stipule que des décrets prendront en charge les prescriptions visées aux articles 119 et 120.

- **Décret exécutif n° 93 -184 du 27 juillet 1993**

Le décret exécutif n° 93-184 du 27 juillet 1993 réglementant l'émission du bruit, dont prend en charge les articles 119 et 120 de la loi 83-03.

Article 2 : Les niveaux sonores maximums admis dans les zones d'habitation et dans les voies et lieux publics ou privés sont de 70 décibels (70 DB) en période diurne (6 heures à 22 heures) et de 45 décibels (45 DB) en période nocturne (22 heures à 6 heures).

Article 3 : Les niveaux sonores maximums admis au voisinage immédiat des établissements hospitaliers ou d'enseignement et dans les aires de repos et de détente ainsi que dans leur

enceinte sont de 45 décibels (DB) en période diurne (6 heures à 22 heures) et de 40 décibels (DB) en période nocturne (22 h à 6 h).

Article 4 : Sont considérés comme une atteinte à la quiétude du voisinage, une gêne excessive, une nuisance à la santé et une compromission de la tranquillité de la population toutes les émissions sonores supérieures aux valeurs limites indiquées aux articles 2 et 3 ci-dessus.

- **Document Technique Réglementaire DTR**

En plus de ces deux lois, on trouve le document technique réglementaire (D.T.R C 3.1.1) qui a pour objet de définir les méthodes de détermination de l'indice d'affaiblissement acoustique (R) des parois et de calcul de l'isolement brut (Db) des parois vis à vis des bruits aériens.

Ce document (DTR) a été appuyé par le journal officiel de la République Algérienne Démocratique n° 51 du 14 septembre 2011.

M.5.1.6. Traitement du bruit d'une LGV

Le bruit est traité de manière préventive et curative par SNTF Réseau. Dès la conception des projets, il est un des éléments de réflexion pour le choix du tracé et l'aménagement des infrastructures. L'amélioration de l'armement des voies permet d'atténuer le bruit de roulement des lignes existantes.

Des dispositifs complémentaires de protection peuvent être nécessaires pour respecter la réglementation en vigueur.

M.5.1.6.1. Actions d'atténuation

- **Tracé de la voie**

Pour réduire, dans la mesure du possible, l'impact sonore des nouvelles lignes, il faut maintenir le tracé à distance des habitations et/ou en abaissant le profil en long en dessous du niveau du terrain.

- **Amélioration de la voie**

Il est possible de jouer sur l'armement de la voie, c'est-à-dire sur le type de rail, les traverses (béton/bois), les fixations, les semelles sous rail ou sous traverses, pour diminuer les émissions de bruit.

- L'utilisation des longs rails soudés (LRS), permet de réduire les vibrations dans le rail et donc le bruit s'en échappant, le gain est là de 3 dB (A) ;
- Le meulage des rails pour les rendre plus lisses ;
- L'utilisation des absorbeurs dynamiques sur rail (Système mécanique de type masse/ressort positionné entre les traverses pour atténuer la propagation de la vibration mécanique dans le rail) peuvent apporter un gain de 1 à 4 dB (A) selon la nature du rail et son mode de fixation. Ils sont essentiellement réservés à des traitements de points singuliers comme des ponts métalliques.

M.5.1.6.2. Actions de protection

Deux types de protection sont possibles :

- **Protection à la source**

Ce sont des mises en place au plus près de l'infrastructure ferroviaire. C'est le mode d'action prioritaire.

Elles prennent la forme d'écrans antibruit ou de buttes de terres (merlons). Ces aménagements permettent des niveaux de protection équivalents, le choix de l'un ou de l'autre est guidé par les emprises disponibles (l'écran occupe une faible surface) et l'opportunité de réaliser des traitements paysagers (les merlons en terre sont végétalisés) ;

Les protections à la source permettent une réduction du bruit de 8 à 10 dB(A) à 50 m de distance.

- **Isolation de façade**

Lorsque les protections à la source ne peuvent être mises en place (inefficaces ou économiquement déraisonnables), l'isolation de façade reste la solution.

Il s'agit de remplacer les fenêtres des bâtiments à protéger par des doubles vitrages à haute performance acoustique si les vitrages existants ne sont pas suffisants. Les entrées d'air, les coffres de volet roulant et la ventilation doivent également être traités.

M.5.1.6.3. Actions complémentaires pour protéger les riverains le long d'une LGV

Mise à part les actions d'atténuation et de protection contre le bruit d'une LGV, l'Algérie doit mettre en place une stratégie pour lutter contre les nuisances sonores issues des lignes à grandes vitesses. Cette stratégie doit comprendre :

- ✓ L'élaboration "des cartes du bruit" qui servent comme des outils d'aide à la décision pour caractériser l'environnement sonore. Ces cartes permettent aussi d'informer les populations sur le niveau global d'exposition aux nuisances sonores ;
- ✓ L'établissement d'un système de mesure et de contrôle centralisé, comme moyen utile pour la réalisation d'un cadastre national des nuisances sonores, afin de caractériser les niveaux sonores et pour mieux suivre leurs fluctuations au niveau des villes et des différents milieux urbains nationaux ;

M.6. CONCLUSION

Comme l'a dit le Président des USA, B. Obama, dans sa High Speed Rail Initiative (avril 2009) : « une LGV, est un système qui réduit le temps de trajet et accroît la mobilité, un système qui réduit la congestion et renforce la productivité, un système qui réduit les émissions polluantes et crée des emplois ». Mais chaque système possède des inconvénients, et dans ce cas, ce sont les nuisances sonores émises.

La demande croissante de mobilité des personnes et des biens entraîne un accroissement du trafic et le développement des infrastructures, engendrant des nuisances sonores de plus en plus mal ressenties par la population malgré les progrès considérables réalisés ces dernières années.

Le bruit est un marqueur de la qualité de vie. Phénomène complexe, avec ses volets physiques, physiologiques et psychologiques. Phénomène fugitif mais ancré dans l'organisation des territoires et des infrastructures. Il n'y a évidemment pas de recette miracle, mais une démarche, un état d'esprit constructif pour aborder ce type de problème, devrait être entreprise.

Cette revue bibliographique reste une initiation à la recherche sur les impacts de l'augmentation de la vitesse ferroviaire sur l'environnement.

CHAPITRE I

"Généralités sur l'infrastructure ferroviaire"

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE

I.1. INTRODUCTION

Tout moyen de transport est basé sur un principe physique et une technologie. Parmi les transports terrestres, le guidage forcé «roues-rails» caractérise le système ferroviaire.

Du système ferroviaire, l'infrastructure en est la composante fondamentale au sens propre du terme, comme l'eau pour le transport maritime ou l'air pour le transport aérien.

Cette infrastructure et ses différentes composantes feront l'objet du présent chapitre.

I.2. DEFINTION D'UNE INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE

Une infrastructure ferroviaire est une installation fixe permettant la circulation des trains. La voie ferrée, les caténaires, les équipements de transport de l'énergie, le système de signalisation ferroviaire, les bâtiments, les ouvrages d'art, le système de communication radio sol-train et les télécommunications sont des infrastructures ferroviaires.



Figure I.1. Infrastructure ferroviaire

I.3. COMPOSANTES D'UNE INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE

I.3.1. Voies

La voie ferrée est la partie principale de l'infrastructure ferroviaire, elle est conçue de manière à assurer la circulation sure et confortable des trains. Elle est dimensionnée de manière à minimiser les opérations d'entretien, qui sont difficile à intégrer dans le cadre de l'exploitation du réseau ferroviaire. Elle est constituée de plusieurs éléments, à savoir :

I.3.1.1. Rails

Le rail est un élément linéaire en acier, doté d'un profil particulier. La mise en parallèle de deux files de rails crée une voie ferrée. On distingue les rails par leurs types de profils (UIC, Vignole, à gorge, à double champignon, etc.) et par la masse d'acier utilisée par mètre linéaire de rail (4). Les rails, d'une longueur pouvant aller jusqu'à 36 m, sont apportés sur place puis sont soudés pour constituer un ensemble continu de plusieurs centaines de mètres, appelé « LRS = longs rails soudés ».

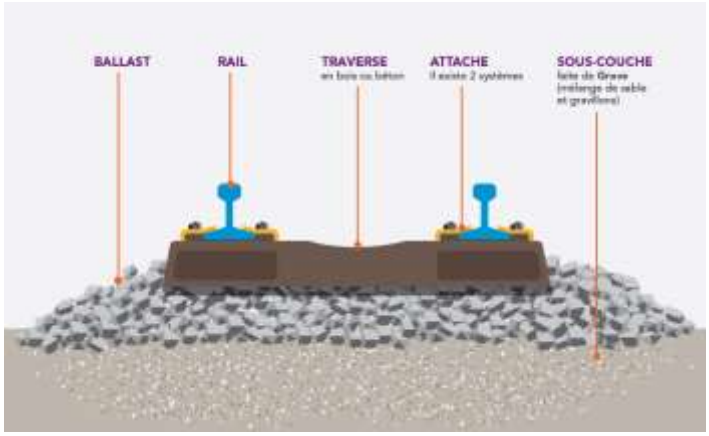


Figure I.2. Constituants de la voie

I.3.1.2. Traverses

Les traverses peuvent être en bois, en acier, en béton armé ou précontraint ou en plastique recyclé. Elles doivent maintenir l'écartement des rails (à l'écartement standard de 1435 mm, distance mesurée entre les flancs intérieurs des rails), et assurer la répartition des charges verticales transmises par le rail sur le ballast (4).



Figure I.3. Traverses mono-bloc et bi-bloc en béton

I.3.1.3. Ballast

Le ballast est composé de matériaux granulaires et constitue la couche de fondation de la voie. Cette couche de pierre est d'environ 30 cm d'épaisseur, soit environ 2 000 tonnes par kilomètre, doit répartir les charges sur la plate-forme et assurer l'écoulement des eaux de ruissellement (5).



Figure I.4. Ballast le long de la voie ferrée

I.3.1.4. Appareil de voie

Les appareils de voie sont constitués de rails spéciaux (croisement de rails) et d'éléments mobiles (aiguille). Ils permettent le passage d'une voie à une ou plusieurs autres.

Ces appareils sont classés en deux catégories :

- Le **branchement** permet de créer une voie déviée à partir d'une voie directe ou d'assurer la communication entre deux voies.
- La **traversée** est le croisement à niveau de deux voies. Elle peut être combinée avec un ou plusieurs branchements : c'est la traversée-jonction simple ou double.



Figure I.5. Branchement simple et Traversée jonction double

I.3.2. Plate-forme et Ouvrages d'art

Comme la route, **la plate-forme** constitue le terrain sur lequel sont posés la voie ferrée et l'ensemble de ses équipements. La largeur de la plate-forme peut être prévue pour supporter jusqu'à une dizaine de voies. Elle traverse les villes, puis serpente au milieu des plaines et des vallées, franchit les cours d'eau et traverse les montagnes au moyen d'**ouvrages d'art**.

- En ville, la voie ferrée chemine souvent en **tranchée ouverte ou couverte** (permettant de réduire les nuisances sonores).
- En plaine, le franchissement d'un court d'eau est assuré au moyen d'un **pont-rail** (métallique ou en béton supportant la voie ferrée).
- En montagne, les ouvrages d'art ferroviaires sont plus spectaculaires et très spécialisés. Nous y apercevons souvent des **viaducs** (permettant de franchir une vallée ou une rivière) et la voie ferrée s'engouffre souvent dans les **tunnels**.



Figure I.6. Pont rail en maçonnerie et tunnel ferroviaire

I.3.3. Signalisation ferroviaire

Depuis l'origine des chemins de fer, la signalisation ferroviaire possède cinq fonctions bien précises : garantir le respect d'une distance de sécurité entre deux trains, protéger les intersections des voies, s'opposer nez à nez sur les voies uniques, transmettre des ordres d'abaissement de vitesse ainsi que des indications aux conducteurs.

La signalisation ferroviaire regroupe l'ensemble des équipements techniques conçus pour assurer la bonne marche des trains, en toute sécurité. Elle est gérée depuis les différents postes d'aiguillage répartis sur l'ensemble du réseau ferré (6).

I.3.3.1. Postes d'aiguillage

Un **poste d'aiguillage** est un bâtiment d'une gare ou d'un complexe ferroviaire qui rassemble les dispositifs nécessaires permettant de commander des appareils de voie et des signaux.

Dans les petites gares le poste d'aiguillage peut se trouver dans le bâtiment de voyageurs ou accolé à celui-ci, au niveau du quai. Généralement les postes d'aiguillage sont surélevés afin que les aiguilleurs aient une vision d'ensemble des voies. Les gares importantes disposent souvent de plusieurs postes.



Figure I.7. Poste d'aiguillage de la gare de Rennes, France

I.3.3.2. Systèmes de détection des trains

Le système de détection des trains est l'ensemble des appareils qui permettent de signaler la présence d'un train à un endroit précis du réseau. Nous distinguons les circuits de voie, les compteurs d'essieux et les contacts de rail.

- Les circuits de voie et les compteurs d'essieux : équipement électrique grâce auquel la présence de véhicules ferroviaires sur un tronçon déterminé du réseau peut être constatée.
- Les contacts de rail : appareils électriques qui sont posés sur la voie et qui détectent le passage d'un train à cet endroit. Il existe différentes sortes de contacts de rail (contact de rail mécanique, pneumatique, magnétique et électromagnétique).

I.3.3.3. Signalisation classique ou latérale

La signalisation classique est constituée de signaux implantés (ou présentés) le long de la voie. Elle est également appelée signalisation latérale et peut être implantée sur des poteaux, des potences ou des portiques (6).



Figure I.8. Signalisation ferroviaire latérale moderne

I.3.4. Installations électriques de traction

Dans le domaine de la traction électrique, il existe deux façons de distribuer l'énergie électrique aux engins moteurs (7):

- Par troisième rail latéral, placé à une distance précise à côté des rails de chaque voie de roulement. C'est la plus ancienne technologie.
- Par fil de contact aérien. L'ensemble de ses fils représente la caténaire servant le courant électrique aux locomotives par l'intermédiaire du pantographe dont les bandes de frottement sont faites en carbone.

I.3.4.1. Sous-stations d'alimentation

Une station de traction est un poste de transformateur utilisé pour générer l'alimentation électrique d'une ligne via les câbles suspendus.

Une sous-station est une cabine où l'électricité des gestionnaires du réseau est transférée dans les câbles haute-tension. Les circuits électriques des voies principales sont coupés par des interrupteurs.

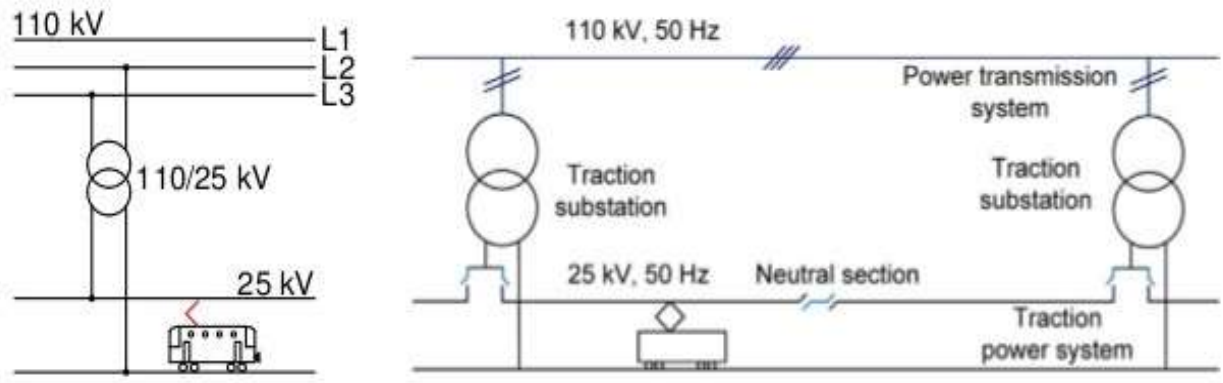


Figure I.9. Système de traction électrique

I.3.4.2. Télécommande

La télécommande permet de commander à distance les appareils électriques des lignes de la caténaire et les stations de traction. Elle est constituée d'un local central principal pour la commande à distance et des tableaux de commande locale au niveau de chaque gare qui contiennent l'appareillage électriques de celle-ci.

I.3.4.3. Caténaires

Une caténaire peut être définie comme étant des câbles suspendus à des poteaux mis sous tension mécanique et électrique, afin d'approvisionner les trains en énergie.



Figure I.10. Caténaire

I.4. CONCLUSION

L'exploitation ferroviaire, de nature très empirique, repose aujourd'hui sur une organisation technique patiemment rodée depuis la mise en service de la première ligne de chemin de fer en Algérie.

Cependant, cette exploitation nécessite une bonne connaissance de tous les éléments qui constituent l'infrastructure ferroviaire, et cela a été présenté dans ce chapitre.

CHAPITRE II

"Généralités sur l'électrification d'une ligne ferroviaire"

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉLECTRIFICATION D'UNE LIGNE FERROVIAIRE

II.1. INTRODUCTION

La traction électrique a toujours été un choix populaire pour les réseaux ferroviaires de transport collectif. Plus récemment, cette technologie a pris de l'importance au sein des systèmes de transport en commun, en raison des préoccupations grandissantes envers le réchauffement planétaire et la durabilité de l'environnement.

De nouvelles technologies innovantes d'alimentation et de régulation ont aussi contribué à réduire les coûts et à améliorer le rendement énergétique de la traction ferroviaire électrique. Aujourd'hui, les réseaux de transport électrifiés offrent une meilleure sécurité et répondent aux besoins diversifiés des déplacements en ville, vers la banlieue et sur de plus longues distances.

Ce présent chapitre a pour objectif de répondre d'une façon générale sur les questions concernant l'électrification d'une voie ferrée.

II.2. SYSTÈME D'ÉLECTRIFICATION FERROVIAIRE

Un système d'électrification ferroviaire est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour alimenter en énergie électrique les trains (locomotive électrique ou rame automotrice électrique). Les trains sont alimentés en courant alternatif haute tension ou en courant continu.

L'alimentation passe par une caténaire ; le retour de courant se fait par le CDPA (60%), les rails de roulement (40%) et 2% courant vagabond.

Le système d'électrification ferroviaire est composé des trois sous-systèmes suivants (4):

II.2.1. Sous-station

La sous-station électrique permet l'alimentation en énergie électrique d'une section de ligne ferroviaire. Elle est raccordée au réseau électrique de haute tension (400 kV, 220kV ou 60 kV), et a pour rôle d'abaisser cette tension à une valeur utilisable par les engins de traction (25 kV).

II.2.1.1. Tensions utilisées

Les tensions électriques utilisées en Europe ont fait l'objet d'une standardisation présentée dans le tableau ci-dessous.

Les valeurs varient en fonction du nombre de trains sur la ligne et de la distance à la sous-station.

Tableau II.1. Tensions électriques standards pour l'électrification ferroviaire

Système d'électrification	Plus basse tension non-permanente	Plus basse tension permanente	Tension nominale	Plus haute tension permanente	Plus haute tension non-permanente
600 V CC	400 V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V CC	500 V	500 V	750 V	900 V	1 K V
1 500 V CC	1 000 V	1 000 V	1 500 V	1 800 V	1 950 V
3 kV CC	2 kV	2 kV	3 kV	3,6 kV	3,9 kV
15 kV CA, 16 2/3 Hz	11 kV	12 kV	15 kV	17,25 kV	18 kV
25 kv CA,50Hz	17,5 kV	19 kV	25 kV	27,5 kV	29 kV

CC pour « courant continu » ; **CA** pour « courant alternatif ».

❖ **Les deux principales tensions d'alimentation**

- Le **1 500 V** en courant continu.
- Le **25 000 V** en courant monophasé alternatif **50 Hz**.

Tableau II.2. Avantages et inconvénients des deux tensions principales

Types de tension	Avantages	Inconvénients
Électrification en 1 500 V CC	1- Des motrices simples et robustes. 2- L'isolation des éléments sous tension facile à réaliser. 3- La possibilité d'effectuer des opérations de maintenance en maintenant la ligne sous tension.	1. Présence nécessaire de nombreuses sous-stations de conversion du courant. 2. Grosses installations fixes.
Électrification en 25 000 V CA	1. Utiliser le courant industriel distribué à partir du réseau général à haute tension. 2. Des sous-stations de traction simples. 3. Des sous-stations espacées de 50 à 70 km. 4. Avoir une caténaire de faible section (légère). 5. Grace à l'apparition des dispositifs redresseurs de courant légers et peu encombrants, le courant alternatif est converti en courant continu sur l'engin moteur.	1. Mise en câble des canalisations électriques aériennes proches de la voie en raison de phénomènes d'influence électrique et d'induction électromagnétique. 2. Obligation d'effectuer, hors tension, la maintenance des caténaires. 3. Difficulté d'isolement dans certaines zones (atmosphère polluée, traction mixte). 4. Le courant doit être converti au niveau des motrices.

❖ **La variante 2×25 kV**

Une variante du système 25kV-50Hz a été développée afin de répondre à la problématique d'alimentation des lignes à grande vitesse. Cette variante, dénommée 2×25kV, est basée sur l'introduction d'un conducteur (feeder) à 25kV le long de la ligne ferroviaire. Ce conducteur est alimenté en opposition de phase par rapport à la caténaire (8).

L'alimentation de la caténaire depuis ce feeder est assurée par des autotransformateurs, répartis le long de la ligne. Un schéma de cette variante est présenté sur la figure II.1.

Il est installé sur les lignes à grande vitesse ainsi que sur certaines lignes à fort trafic et permet de conserver les technologies d'électrification 25kV existantes (type de caténaire, trains...). Il présente toutefois l'inconvénient de nécessiter un nombre important d'autotransformateurs, même si la construction de ceux-ci est relativement simple et leur encombrement réduit.

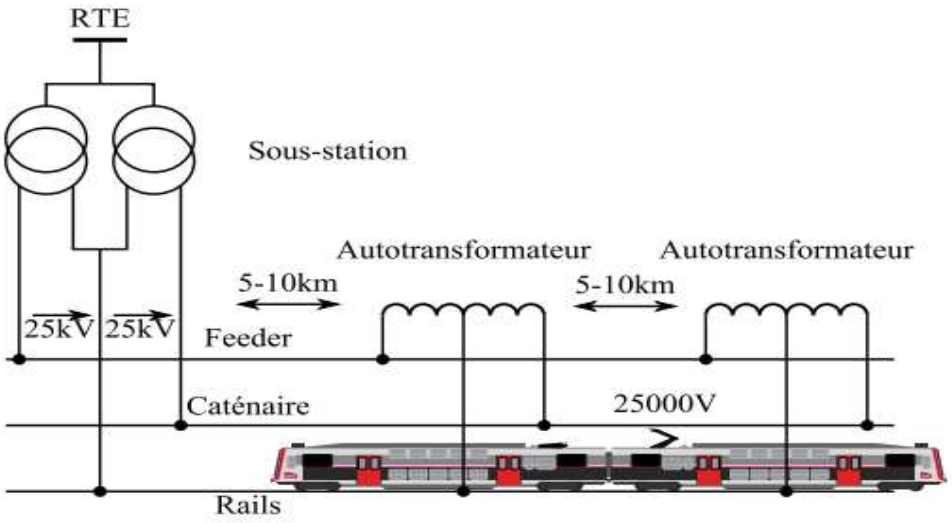


Figure II.1. Système d'électrification 2×25kV 50Hz

II.2.1.2. Equipements des sous-stations

La sous-station est un poste d'alimentation composé d'un jeu de barres et des équipements de protection et de coupure permettant de séparer les lignes et la sous-station, deux groupes de transformateur, des départs caténaires avec des moyens de sectionnement ainsi que des auxiliaires (8).

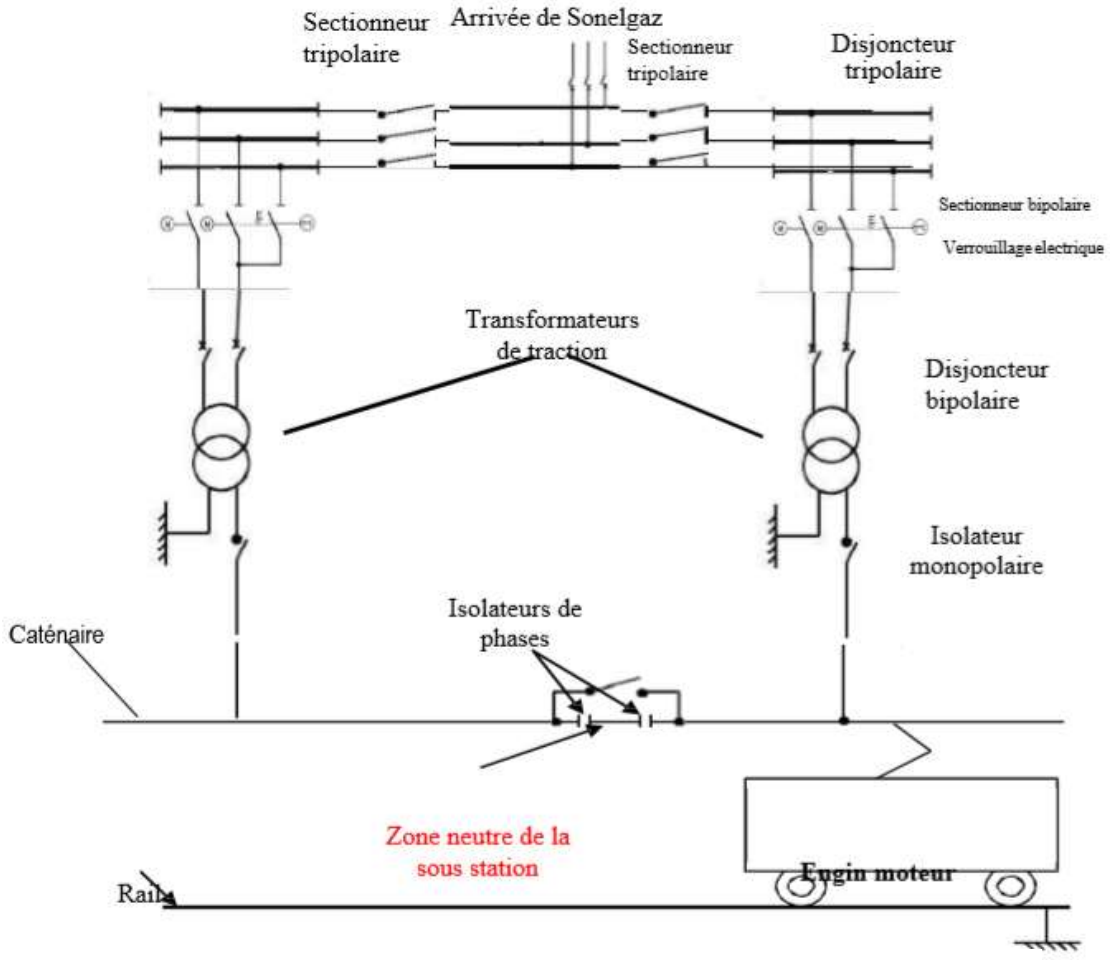


Figure II.2. Schéma simplifié d'une sous-station et ses équipements

II.2.1.3. Mode de fonctionnement des sous-stations

La sous-station est équipée de deux transformateurs de traction monophasés. Chaque transformateur est raccordé à deux phases parmi les trois phases du réseau de haute tension et alimente un secteur, ces secteurs sont séparés par une zone neutre empêchant le chevauchement des phases.

On distingue trois catégories de mode de fonctionnement :

- **Mode de fonctionnement normal**

En mode d'exploitation normal, les deux transformateurs fonctionnent en même temps alimentant chacun un secteur dans un seul sens.

- **Fonctionnement en mode dégradé catégorie 1**

Il s'agit en général d'une défaillance d'un transformateur de traction dans une sous station. Avec cette défaillance, on basculera vers le mode dégradé 1, là où un seul transformateur est utilisé pour alimenter les deux secteurs.

- **Fonctionnement en mode dégradé catégorie 2**

C'est le cas d'une défaillance totale d'une sous-station de traction, dans ce mode, la sous station adjacente alimente la section de la sous station qui est hors service.

Dans ce cas, on ouvre les sectionneurs reliant la sous station en panne et on ferme les sectionneurs des sections neutres adjacentes afin de permettre à chacune des secteurs d'être alimentées par les sous stations voisines.



Figure II.3. Sous-station de traction électrique

II.2.2. Sous système caténaire

La caténaire est le sous-système permettant l'acheminement de l'énergie électrique depuis les sous-stations jusqu'aux rames du matériel roulant (pantographe).

La caténaire est l'ensemble des câbles, qui surplombent les voies, supportée par des poteaux (ou support) scellés dans des massifs de béton. L'ensemble du matériel de liaison, qui assure la suspension de la caténaire à partir des supports est désigné par le terme armement.

II.2.2.1. Éléments de la caténaire



1. Câble de feeder
2. Câble porteur
3. Fil de contact
4. Support

Figure II.4. Les éléments de la caténaire

- **Supports**

Le support est fréquemment en profilé métallique galvanisé « HEA ou HEB », encastré et scellé dans le massif de fondation en béton avec des tiges d'ancrage.

- **Fil de contact**

Le fil de contact rainuré fait partie du sous-système caténaire pour pouvoir transmettre l'énergie électrique aux locomotives, il doit être conforme aux **normes EN 50149**.

- **Câble porteur**

Le porteur peut être en cuivre Cu, bronze Bzll, ou en Al-acier, en fonction des critères dynamiques et du résultat du dimensionnement électrique.

- **Pendule**

Le fil de contact est suspendu au câble porteur par les pendules, ils relient de leur part une griffe sur le câble porteur et d'autre part une griffe sur le fil du contact.

- **Armement**

Ce sont les consoles de type triangulaire qui assurent la suspension de la caténaire à partir des supports.

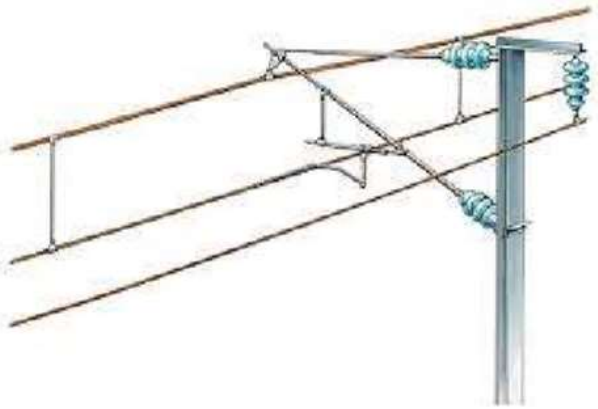


Figure II.5. Console caténaire

❖ **Feeder**

Le feeder est un moyen de maintenir une continuité du courant, il assure l'alimentation en courant de la caténaire.

Il existe trois types de feeder :

- Le feeder de renfort qui permet de diminuer les pertes en tension entre deux sous-stations ;
- Le feeder négatif qui est utilisé souvent pour les caténaires 2×25 kV (les LGV) ;
- Le feeder normal d'alimentation.

❖ **Appareils tendeurs**

Les conducteurs comme tous les métaux, se dilatent sous l'action de la chaleur, leur longueur augmente ou diminue suivant la température. Afin de régulariser la hauteur du fil de contact, un dispositif est installé à l'aide d'un contre poids attaché au fil de contact et un autre pour le câble porteur des deux extrémités (début et fin de tir) afin d'avoir une hauteur indépendante par rapport aux variations de la température.



Figure II.6. Appareil tendeur muni d'un contre poids

II.2.3. Sous-système SCADA

Le système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA), est un système de télégestion à grande échelle permettant de traiter en temps réel un grand nombre de télémesures et de contrôler à distance les installations de traction électrique ferroviaire.

Un système SCADA est un logiciel qui fait partie du centre de commande à distance de l'énergie de traction (CCDET) ; Ce dernier comporte du matériel, des régulateurs, des réseaux de communications, une base de données, un logiciel de gestion d'entrées-sorties et une interface homme-machine. Les informations de terrain du système SCADA sont centralisées sur une unité centrale. Celle-ci permet à l'opérateur de commander tout ou une partie des actionneurs d'une installation souvent très étendue (6).



Figure II.7. Bureau de surveillance dans le système SCADA

II.3. ÉTAPES DE L'ÉLECTRIFICATION FERROVIAIRE

Un projet d'électrification d'une ligne ferroviaire comporte les étapes suivantes :

- ✓ Première étude de planification et de faisabilité, afin de déterminer les capacités et les besoins en électricité.
- ✓ Simulation de traction afin d'établir et de confirmer la puissance disponible ou la puissance d'exploitation pour tout un réseau, ou pour une ligne en particulier.
- ✓ Conception préliminaire de la caténaire avec l'établissement de l'avant-projet de piquetage.
- ✓ Avant-projet détaillé (APD) avec tous les plans nécessaires pour l'installation de la caténaire.
- ✓ Etude d'exécution.
- ✓ Essais de vérification avant la mise en service du système.

II.4. CONCLUSION

L'électrification des lignes ferroviaires, constitue une alternative efficace et justifiée pour un mode de transport confortable, rapide et durable.

Cette modeste recherche bibliographique a permis d'enrichir les connaissances préalables sur les différents sous-systèmes de la traction électrique ainsi que les étapes primordiales d'une étude d'électrification ferroviaire que l'ingénieur doit connaitre.



CHAPITRE III

"Présentation du projet et collecte des données"



CHAPITRE III : PRÉSENTATION DU PROJET ET COLLECTE DES DONNÉES

III.1. INTRODUCTION

Tout projet répond à un besoin : un désir, une nécessité ou un manquement. La phase de la collecte de donnée définit les besoins en posant les objectifs de l'aménagement afin d'évaluer sa faisabilité. La principale activité à ce niveau consiste à identifier les fonctions, les contraintes et les informations requises pour poursuivre le processus de l'étude.

L'objet de ce chapitre est de présenter le projet de l'électrification de la banlieue d'Alger, et en particulier, une de ses gares qui est la gare de "Rouiba" ainsi que toutes les données de base nécessaires à cette étude.

III.2. PRÉSENTATION ET OBJECTIFS DU PROJET

Le projet de l'électrification de la banlieue d'Alger concerne une ligne ferroviaire qui se décompose en trois grandes parties :

- **Alger – Thénia** : Cette partie s'étale sur une longueur de 54 Km avec deux à trois voies principales, elle démarre de la GARE ALGER TERMINUS, jusqu'à la GARE THENIA, et est constituée de dix gares et neuf haltes.
- **Oued Semar – Gué de Constantine** : Ce tronçon a une longueur d'environ 8 Km avec deux voies principales. La ligne démarre de la GARE DE GUÉ DE CONSTANTINE, jusqu'à la GARE DE OUED SEMAR.
- **El Harrach – El Affroun** : Cette ligne atteint à peu près la longueur de 59 Km et comporte sept gares et une halte.

Ce projet qui s'étale sur 120 Km, a pour but principal de diminuer le temps de parcours ferroviaire dans la banlieue algéroise.

Cette infrastructure ferroviaire permettra non seulement le développement du secteur du transport terrestre de la wilaya d'Alger vu l'importance de la ligne pour les voyageurs ainsi que les marchandises, mais viendra aussi répondre à la volonté des autorités pour le développement économique de la région, car elle est sensée générer plus de 1 000 postes de travail directs et autres indirects.

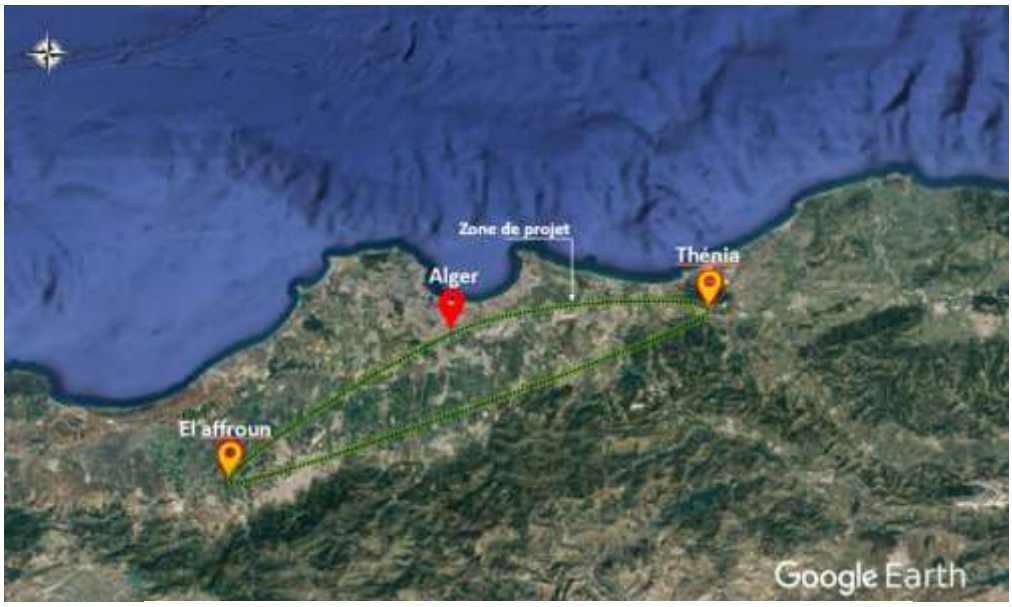


Figure III.1. Situation de la zone de projet sur une carte Google Earth

L'objectif de ce projet est de doter la banlieue Algéroise d'une infrastructure ferroviaire modernisée afin d'améliorer les conditions de transports des voyageurs, à travers l'électrification de la ligne.

III.3. CHOIX DE LA GARE

Parmi les gares de ce grand projet, nous avons choisi la gare de "Rouiba" avec un tronçon de la ligne de Pk 24+700 jusqu'à Pk 26+400 pour notre étude. Cette gare appartient à la ligne Alger- Thénia et elle comporte deux quais ainsi que quatre voies. Ce choix se justifie par le fait que les données de cette gare sont disponibles.

III.3.1. Situation et description de la gare de Rouiba

La gare de Rouiba est située au centre de la ville de Rouiba à environ 20 Km à l'Est de la ville d'Alger.

La zone de la gare est une partie de la plaine de Mitidja à une altitude d'environ 20 m qui marque l'exception de sa nature plate, entourée par des habitations de hauteur variable. Ses coordonnées sont :

- Latitude : 36°44'03''N.
- Longitude : 3°16'58''E.



Figure III.2. Implantation du tronçon étudié sur Google Earth

III.4. COLLECTE DES DONNÉES

III.4.1. Données sur la ligne ferroviaire

La ligne choisie pour cette étude s'étale sur 1.7 Km, de PK 24+700 au PK 26+400. Elle a été conçue avec les caractéristiques géométriques suivantes :

- Une vitesse maximum de **120 km/h** sur les voies principales et de **40 km/h** sur les voies secondaires.
- Un écartement des rails standard qui s'élève à **1435mm** en alignement avec un profil **UIC 54**.
- Profil de la voie : Max **16‰** en pleine voie (exceptionnellement **18‰**) et **6‰** au niveau de la gare.

III.4.1.1. Tracé en plan

Les caractéristiques du tracé en plan de la ligne sont représentées dans le tableau III.1 :

Tableau III.2. Les caractéristiques du tracé en plan de la ligne

	Voies principales V1 et V2				
Point kilométrique	Pk 24+700 au Pk 25+061	Pk 25+061 au Pk 25+219	Pk 25+219 au Pk 25+307	Pk 25+307 au Pk 25+450	Pk 25+450 au Pk 26+400
Type de géométrie	Alignement	Clothoïde	Arc R=800m	Clothoïde	Alignement
Longueur (m)	L = 405.363	L = 140	L = 88.07	L = 140	L = 950

III.4.1.2. Gabarit du matériel roulant

Le matériel roulant "FLIRT" utilisé dans ce projet est de type GC- UIC 505-1 avec un contour de référence de la figure III.3 :

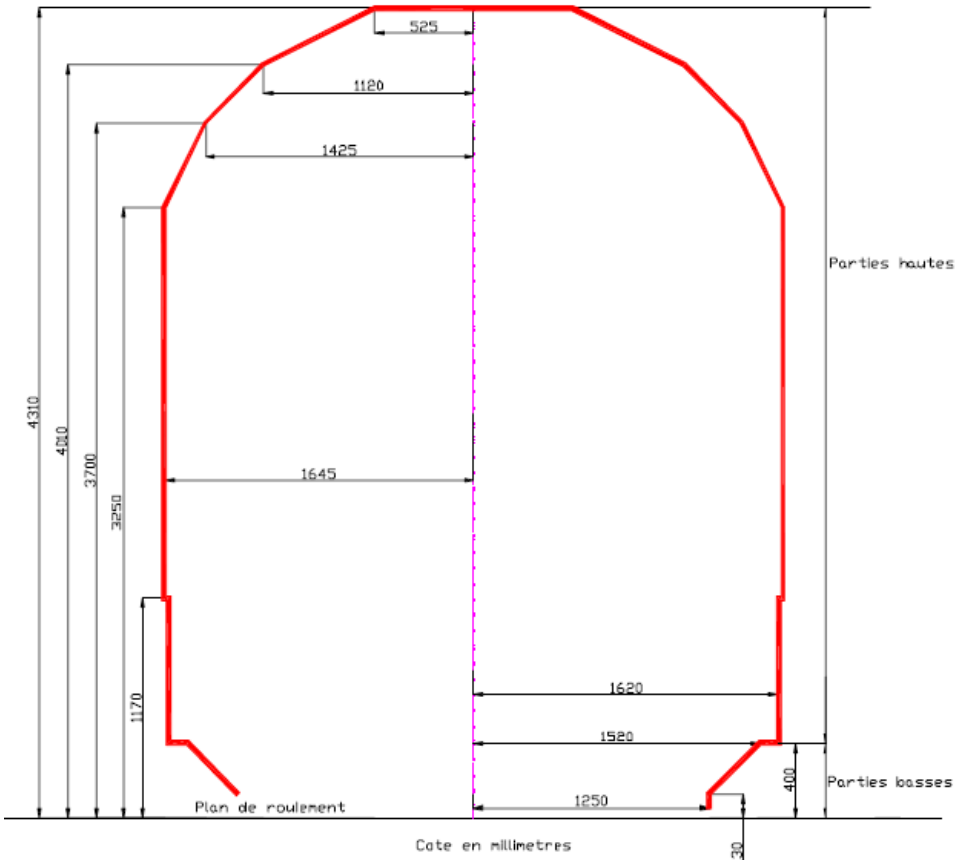


Figure III.3. Contour de référence du gabarit cinétique type GC – UIC 505-1

III.4.1.3. Pantographe

Les caractéristiques des pantographes des automotrices destinées au trafic voyageur de la banlieue sous tension alternative 25 kV sont :

Tableau III.2. Les caractéristiques du pantographe

Type de pantographe	Selon la norme EN 50206-1
Profil et largeur de l'archet	1600 mm Selon la norme UIC 608
Enveloppe statique du pantographe	1450 mm
Longueur utile du frottement	800 mm
Matière des bandes d'usure	Carbone

III.4.2. Données sur la caténaire

La caténaire proposée pour ce projet sera électrifiée au moyen d'un système de fourniture électrique avec du courant alternatif de 50 Hz et une tension de 25 kV à double voie, avec les critères mécaniques et électriques appropriés. Ce choix a été fait après la détermination du besoin énergétique du projet par les électrotechniciens pour des vitesses jusqu'à 200 km/h.

III.4.2.1. Composition

- **Fil de contact**

Pour le système d'alimentation 1×25 kV, le fil de contact recommandé est de 107mm² de section en cuivre dur électrolytique de 98% de conductibilité, sa masse est de 0.950 kg. La hauteur nominale du fil est égale à 5.5m, la hauteur maximale égale à 6.20m et la hauteur minimale est prise égale à 4.85m.



Figure III.4. Profil du fil de contact rainuré de 107 mm² de section

- **Câble porteur**

Dans le cadre de ce projet, le câble porteur recommandé est de 65.4 mm² de section en Bronze.

- **Pendule**

Le pendule est composé de trois éléments :

- Une griffe à crochet pour porteur en bronze de section 65.4 mm².
- Une griffe à crochet pour fil rainuré en cuivre.
- Un câble en Bronze, degré II avec embouts à cosse sertis avec une section égale à 12mm² de longueur déterminée suivant les exigences.

- **Circuit de retour**

Le circuit de retour du courant de la traction est composé du câble CDPA et des rails, des connexions rail – poteaux sont établies afin de mettre la liaison équipotentielle de l'ensemble du système. Le type de câble utilisé dans ce projet est en aluminium-acier de AlAC 240/40 mm² de section.

III.4.2.2. Performances

La conception de la caténaire pour le projet de la banlieue d'Alger a été faite pour atteindre les performances suivantes :

- Une vitesse de 200 km/h.
- Une résistance des fils conducteurs à une température variant de -10°C à 80°C.
- Une résistance à la traction des câbles de 12 KN.

III.4.3. Données météorologiques

III.4.3.1. Climat et température

La région d'Alger bénéficie d'un climat tempéré chaud, l'emplacement étant classé « climat méditerranéen chaud avec été sec » (Csa) selon la classification de Köppen-Geiger. La wilaya affiche une température moyenne annuelle de 17.7 °C.

III.4.3.2. Vent

Sur la base de la classification des zones climatiques du vent présente sur le DTR RNV2013, la wilaya d'Alger étant classée **Zone I** avec une vitesse normale égale à 29 m/s.

III.4.4. Données Sismiques

Selon le Règlement Parasismique Algérien 99/2003, la zone d'étude fait partie de la Zone III, ce qui signifie que c'est une zone de sismicité élevée.

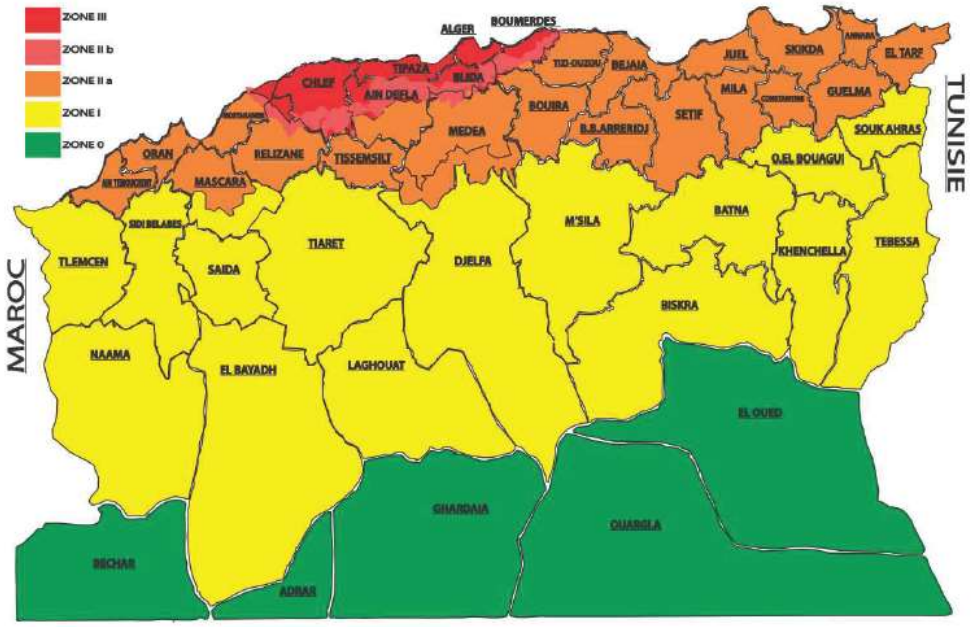


Figure III.5. Carte de zonage sismique du territoire national

La structure présente dans ce projet étant classée dans la catégorie 2 (ouvrages courants), le coefficient d'accélération de la zone de projet est de A= 0.25g.

Tableau III.3. Coefficient d'accélération de la zone A

	Zone			
Groupe	I	Iia	IIb	III
1A	0.15	0.25	0.30	0.40
1B	0.12	0.20	0.25	0.30
2	0.10	0.15	0.20	0.25
3	0.07	0.10	0.14	0.18

III.4.5. Données physiques

III.4.5.1. Caractéristiques géotechniques

L'étude de sol a pour objectif de préciser la nature, la disposition ainsi que l'épaisseur des différentes couches lithologiques du sol, leurs caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques, afin d'adapter le projet aux conditions géotechniques du terrain, tel que le mode de fondation (type et ancrage), le taux de travail et l'évaluation des risques éventuels (stabilité, agressivité, gonflement…).

D'après le rapport géotechnique du projet, nous avons les données fournies par le tableau III.4.

Tableau III.4. Données du sol

Élément	N° de Sondage	Paramètre	Attribut
Sol de fondation	2	$\gamma_d^{max}(\mathrm{t}/m^3)$	2,16
	4	$\gamma_d^{min}(\mathrm{t}/m^3)$	1,40

III.5. CONCLUSION

À travers ce chapitre, nous avons pu synthétiser les principaux aspects techniques à considérer pour la présente étude. Dans le chapitre suivant, les données prédéterminées vont être utilisées afin de réaliser un plan de piquetage de la caténaire pour l'électrification de la gare de Rouiba, ainsi que les calculs des supports et leurs fondations.

CHAPITRE IV

"Étude géométrique : Avant-projet de piquetage"

CHAPITRE IV : ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE, AVANT-PROJET DE PIQUETAGE

IV.1. INTRODUCTION

Après avoir cerné dans le chapitre précédent les données techniques du projet, il s'agit dans le courant chapitre d'établir un avant-projet de piquetage dans le but d'étudier géométriquement l'emplacement de la caténaire et proposer une variante susceptible d'être réalisée compte tenu du contexte local de la banlieue Algéroise.

IV.2. DÉFINITION

L'avant-projet de piquetage est une partie primordiale dans l'étude de l'électrification d'une voie ferrée. Elle consiste à établir un plan de piquetage qui comprend les supports de la caténaire et leur emplacement le long de la voie courante et de la gare.

IV.3. CRITÈRES DU PROJET

Toutes les études sont établies en respectant plusieurs critères imposés par le projet. Dans cette optique, il convient de préciser que l'étude de l'avant-projet de piquetage doit se faire en tenant compte des points suivants :

- Le schéma d'alimentation et de sectionnement.
- Les ouvrages d'art.
- Les zones particulières.
- Le schéma de signalisation.

IV.3.1. Schéma d'alimentation et de sectionnement "SAS"

Il consiste à diviser électriquement la caténaire en sections et sous-sections (cantons) à travers des appareils de coupure. Ce schéma sera utilisé pour déterminer :

- L'emplacement des sectionnements (les appareils de coupures).
- La répartition : des sectionnements, des zones neutres, des mises en parallèle, des équipements tendeurs et des anti-cheminements.

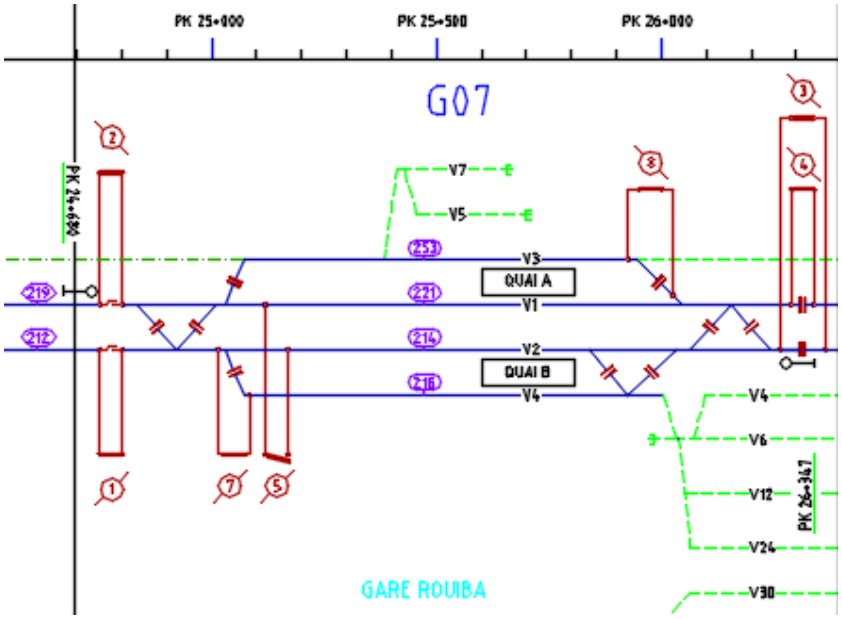


Figure IV.1. SAS de la gare de Rouiba

(Cf. détails sur le SAS du projet de la banlieue d'Alger en ANNEXE A.)

IV.3.2. Ouvrages d'art

Les caractéristiques des ouvrages d'art qui enjambent la ligne ferroviaire conditionnent l'étude de piquetage aux abords des ouvrages. Pour cela, il faut tenir compte des caractéristiques suivantes :

- La nature de l'ouvrage.
- La forme de l'intrados.
- La hauteur libre (actuelle et projetée).
- La marge d'entretien de la voie.
- Le type de l'équipement envisageable (passage libre, suspension aux faces, ancrage porteur).

Pour ce projet, et en particulier le tronçon étudié (du PK 24+700 au PK 26+400), il existe un passage supérieur au PK25+383 avec une hauteur minimale mesurée H_{min}= 5,87 m.

IV.3.3. Zones particulières

Ce sont des zones où il faut limiter les portées entre les supports de la caténaire, comme :

- Les zones ventées : où il conviendra de limiter la portée au maximum à 54 m.
- Les zones sur ouvrage élevé : où il faut considérer un vent plus violent et diminuer les portées.
- Les zones foudroyées : où des installations pourraient être requises.

IV.3.4. Schéma de signalisation

Chaque infrastructure ferroviaire possède un schéma de signalisation pour maintenir la bonne circulation des trains. Les signaux présents le long de la ligne sont considérés comme des contraintes pour l'installation de la caténaire, il conviendra donc d'adapter les portées selon l'emplacement de ces signaux.

IV.4. RÈGLES ET NORMES UTILISÉES

L'étude de l'avant-projet de piquetage suit des règles pour l'implantation des supports de la caténaire selon des normes bien précises.

IV.4.1. Règles de piquetage

Pour un meilleur choix du plan de piquetage, il est recommandé de suivre les règles suivantes :

- Pour une ligne de deux voies, la caténaire doit être supportée par des supports indépendants, implantés en vis-à-vis de part et d'autre des voies dans le plan perpendiculaire de celles-ci, cas très exceptionnels, tels que obstacles importants d'un côté de la plateforme ou terrain très inconsistant.
- Pour les zones à voie unique, il faut implanter les supports de telle manière qu'ils ne gênent pas un futur doublement de la ligne.
- Pour les zones à double voie en cas de présence d'obstacles du côté de la voie et les zones de plus de trois voies :
  - Si l'entrevoie le permet, il est possible d'implanter des supports indépendants ou des supports "parapluie".

  - Si l'entrevoie ne le permet pas, il est nécessaire d'utiliser des portiques (rigides si la caténaire est régularisée ou souples dans le cas contraire).
- Respecter les portées maximales et minimales en alignements et en courbe.

IV.4.2. Normes utilisées

Nous avons utilisés dans cette partie de l'étude les normes de la SNCF ainsi que celles mentionnées ci-dessous :

- **EN 50119** : Applications ferroviaires, installations fixes, lignes aériennes de contact pour la traction électrique.
- **EN 50163** : Applications ferroviaires tensions d'alimentation des réseaux de traction.
- **UIC 606-2** : Installations des lignes de contact 25 Kv, 50 ou 60 Hz.
- **UIC 608** : Conditions à respecter pour les pantographes des engins moteurs utilisés en service international.

IV.5. LONGUEUR DU CANTON DE POSE

Tout d'abord, il faut noter que la caténaire standard est tendue avec une force de l'ordre de 12 KN. La tension permet de compenser les variations de longueur des câbles dues aux changements de température (dilatation), au fluage (étirement du fil) et aux limites de soulèvement du fil de contact au passage du pantographe (risque d'arrachement).

Pour assurer la tension mécanique ainsi que pour faciliter l'entretien de la caténaire, celle-ci est découpée en cantons de 700 à 1500 m aux extrémités desquels sont fixés des appareils tendeurs (utilisant des contrepoids et des poulies).

Pour le présent projet, la longueur maximale d'un canton est égale à 1400 m. Cette valeur est calculée sur la base de deux critères qui sont :

- Critère de déplacement des contrepoids ;
- Critère de perte due à la rotation des consoles.

Les détails sur ces deux critères sont en ANNEXE A.

IV.6. DÉTÈRMINATION DES PORTÉES

La portée est une partie de la ligne aérienne de contact située entre deux supports ou points de suspension successifs. La valeur de la portée n'est pas la même en alignement qu'en courbe. Pour cette dernière, la portée sera déterminée en fonction du rayon de courbure.

Selon les normes de la SNTF, on distingue :

Tableau IV.1. La portée maximale et minimale selon la norme

	En alignement	**En courbe**	**En zone ventée**	**En zone très ventée ou montagneuse**
Portée maximale	63 m	En fonction des rayons de courbe	54 m	45m
Portée min	Ne pourra pas être inférieure à 22.5 m			

(Cf. Tableau A.1 en Annexe A pour consulter le tableau des portées en courbe en fonction des rayons).

Ces portées extrêmes données par la norme peuvent être utilisées dans un cas général. Cependant, chaque projet possède ses critères qui peuvent donner une portée maximale égale ou différente à celle proposée par la norme, pour cela, la première étape consiste à déterminer la portée maximale à travers des vérifications avec les données du projet.

IV.6.1. Paramètres nécessaires pour la détermination des portées

IV.6.1.1. Désaxement

C'est une disposition en zigzag horizontal prévue au montage des fils de contact, pour éviter une usure localisée sur les bandes de frottement des pantographes.

Selon les normes, il existe une valeur nominale pour le désaxement en alignement ainsi qu'en courbe.

- En alignement et en voies principales, il est égal à ± 200 mm.

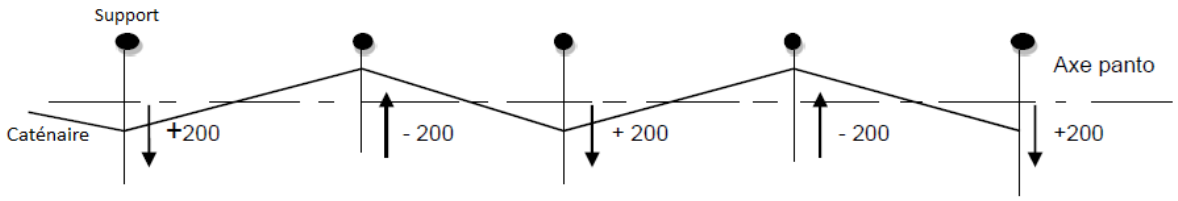


Figure IV.2. Désaxement en voie principale

- En alignement et en voies de service, le désaxement passe de – 200 mm à + 200 mm en cinq (05) portées en passant par -100, 0 et +100 mm.

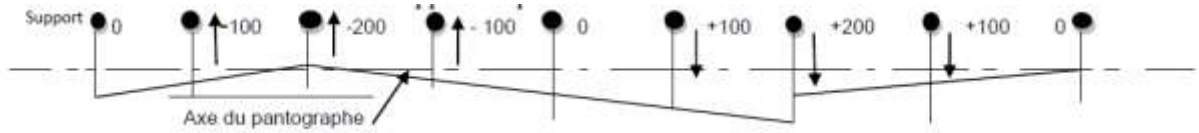


Figure IV.3. Désaxement en voie de service

- En courbe, il n'excède jamais 240 mm et se trouve généralement sur l'extérieur de cette courbe.

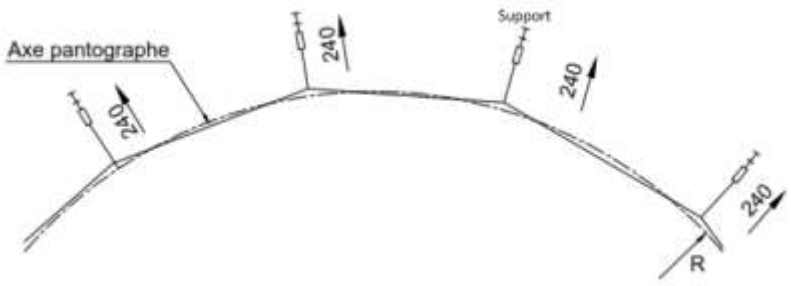


Figure IV.4. Désaxement en courbe

❖ Convention de signe

La convention de signe pour le désaxement est la suivante :

- Le moins − : Si le désaxement est dans la direction du support ;
- Le plus + : Si le désaxement est dans la direction opposée du support.

IV.6.1.2. Balancement latéral théorique du pantographe

IV.6.1.2.1. En alignement et en courbe avec dévers ≤ 66mm

Le balancement du pantographe dans ce cas est donné par la formule suivante :

$$B = 0.110 + (H - 5) \times 0.04 + \frac{L - 1.435}{2} + 0.025 + \frac{0.01 \times H}{1.5}$$

Avec :

- B : Balancement latéral théorique du pantographe ;
- L = 1.435 m : Écartement de la voie ;
- H = 5.5 m : Hauteur du fil de contact.

$$\boldsymbol{B = 0.192m \quad \rightarrow \quad B = 192\ mm}$$

IV.6.1.2.2. En alignement et en courbe avec dévers > 66mm

Dans ce cas, le balancement du pantographe est donné par la formule suivante :

$$B = 0.110 + (H - 5) \times 0.04 + \frac{L - 1.435}{2} + 0.025 + \frac{0.01 \times H}{1.5} + \frac{2.5}{R} + 0.15 \times (D - 0.066) \times (H - 0.5)$$

Avec :

- B : Balancement latéral théorique du pantographe ;
- L = 1.435 m : Écartement de la voie ;
- H = 5.5 m : Hauteur du fil de contact ;
- R =150 m : Rayon minimum de la voie ;
- D = 0.16 m : Dévers maximum de la voie.

$$\boldsymbol{B = 0.279\ m \quad \rightarrow \quad B = 279\ mm}$$

IV.6.1.3. Flèche de la courbe en milieu de portée

La flèche de la courbe en milieu de portée est donnée par la formule suivante :

$$F = \frac{a^2}{8 \times R}$$

Avec :

- F : Flèche de la courbe en milieu de portée ;
- R : Rayon de la courbe ;
- a : Portée.

IV.6.1.4. Désaxement du fil de contact en milieu de portée

Ce désaxement est donné par la formule suivante :

$$f' = F - \left|\frac{b_1 + b_2}{2}\right|$$

Avec :

- f' : Désaxement du fil de contact par rapport à l'axe du pantographe en milieu de portée ;
- b_1 : Désaxement au niveau du premier support de la portée ;
- b_2 : Désaxement au niveau du second support de la portée.

IV.6.1.5. Déplacement du fil de contact

IV.6.1.5.1. Pression dynamique du vent sur le fil

Cette pression peut être calculée à travers la formule que préconise le RNV 2013 :

$$q_w = \frac{\gamma \times V^2}{2 \times g}$$

Avec :

- q_w : Pression dynamique du vent sur un fil ;
- V = 29 m/s : Vitesse maximale du vent ;
- g = 9.81 m/s² : Accélération de la pesanteur ;
- $\gamma = 1.2$ kg/m^3 : Masse volumique de l'aire donnée par le RNV2013.

$$\boldsymbol{q_w = 514.37 \text{ N/m}^2}$$

IV.6.1.5.2. Déplacement maximum du fil de contact sous l'action du vent

Ce déplacement en fonction de la portée maximale est donné par la formule suivante :

$$U_d = \frac{q_w \times C_x \times (D_1 + D_2) \times a^2}{8 \times (T_1 + T_2)}$$

Avec :

- U_d : Déplacement maximum du fil de contact sous l'action du vent ;
- C_x= 1.25 : Coefficient de traînée des fils ;
- $a =$ 63m : Portée maximale donnée par la norme ;
- q_w= 514.37 N/m² : Pression dynamique du vent sur un fil ;
- D_1= 0.01224 m : Diamètre du fil de contact ;
- D_2= 0.0105 m : Diamètre du câble porteur ;
- $T_1 = T_2$= 12 000 N : Tension du fil de contact et câble porteur successif.

$$\boldsymbol{U_d = 0.302\ m \quad \rightarrow \quad U_d = 302\ mm}$$

IV.6.1.5.3. Déplacement maximum du fil de contact en tenant compte du désaxement aux supports encadrant (en alignement)

Ce déplacement est donné par la formule suivante :

$$U_{d'} = U_d + \frac{(|b_1| + |b_2|)^2}{16 \times U_d} + \frac{(|b_1| - |b_2|)}{2}$$

Avec :

- $U_{d'}$: Déplacement maximal du fil de contact en fonction du désaxement des supports ;
- U_d = 0.302 m : Déplacement maximum du fil de contact sous l'action du vent ;
- b_1= +0.2 m : Désaxement au niveau du premier support de la portée ;
- b_2= -0.2 m : Désaxement au niveau du second support de la portée.

$$\boldsymbol{U_{d'} = 0.335\ m \quad \rightarrow \quad U_{d'} = 335\ mm}$$

IV.6.2. Détermination de la portée maximale

IV.6.2.1. En alignement

La méthode de calcul de la portée maximale en alignement consiste à vérifier que le fil de contact reste sur la largeur résiduelle suffisante de l'archet, dans le cas le plus défavorable du :

- Balancement latéral théorique du pantographe ;
- Déplacement du fil de contact sous l'action du vent (en tenant compte des désaxements aux supports caténaires).

Autrement dit :

$$\boldsymbol{B + U_{d'} < 535\ mm}$$

Avec :

- B = 192 mm : Balancement latéral théorique du pantographe ;
- $U_{d'} = 335$ mm : Déplacement maximal du fil de contact en fonction du désaxement des supports ;
- 535 mm : Largeur résiduelle suffisante de l'archet de 1450 mm.

Donc, pour une portée de 63 m et un désaxement de 200 mm, nous avons :

$$B + U_{d'} = 192 + 335 = 527mm < 535\ mm \quad \textbf{C'est vérifié !}$$

Alors, la portée maximale en alignement pour ce projet égale à **63 m**.

IV.6.2.2. En courbe

La méthode de calcul de la portée maximale en courbe consiste à vérifier que le fil de contact reste sur la largeur résiduelle suffisante de l'archet, dans le cas le plus défavorable du :

- Balancement latéral théorique du pantographe ;
- Déplacement du fil de contact sous l'action du vent ;
- Désaxement du fil de contact par rapport à l'axe du pantographe en milieu de portée.

Autrement dit :

$$\boldsymbol{B + U_d + f' < 535\ mm}$$

Pour chaque rayon, nous allons vérifier cette inégalité avec la portée qui convient selon la norme ; Pour le tronçon étudié, nous avons :

$R = 800m \rightarrow a = 45m \rightarrow B = 279mm\ (Dévers > 66mm) \rightarrow U_d = 154mm$

$\rightarrow f' = 76mm \quad avec\ b_1 = b_2 = -240$ mm

Donc :

$$B + U_d + f' = 279 + 154 + 76 = 509 < 535 \quad \textbf{C'est vérifié !}$$

Alors, la portée maximale en courbe de rayon R=800m pour ce projet égale à **45 m**.

IV.6.3. Portée en raccordement parabolique ou clothoïde

Le passage d'un alignement à une courbe de rayon R se fait par l'intermédiaire d'un raccordement parabolique ou clothoïdal. Son début, coté alignement droit, est dit "origine de raccordement parabolique" (ORP) ; et sa fin, coté courbe, est dit " fin de raccordement parabolique et est identifié " (FRP).

La longueur d'une portée, incluse en totalité ou en partie dans le raccordement, est déterminée en fonction du rayon R' à l'extrémité de cette portée soit :

$$R' = \frac{R \times l}{X}$$

Avec :

- R : Rayon de la courbe ;
- l : Longueur du raccordement parabolique ;
- X : Distance de l'ORP au point le plus éloigné de la portée.

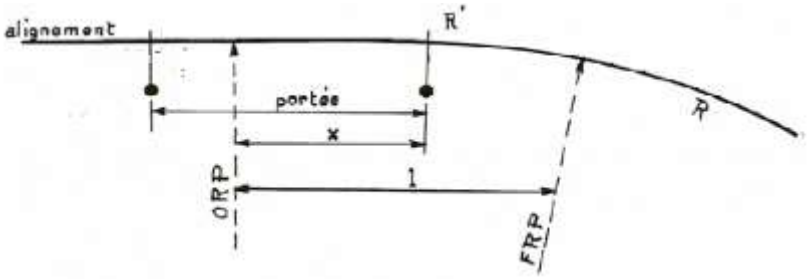


Figure IV.5. La portée en raccordement parabolique

IV.6.4. Raccordement en pentes

La hauteur de la caténaire, mesurée entre le plan supérieur des rails et le fil de contact est variable et dépend de la présence d'obstacles (ponts, tunnels) ou de points singuliers comme les passages à niveaux.

- Hauteur maximale du fil de contact : 6.20 m ;
- Hauteur minimale du fil de contact : 4.65 m.

Pour passer de la hauteur nominale 5.50 m à la hauteur sous ou sur l'obstacle, un raccordement progressif en pente est nécessaire. Ce raccordement en pente est en relation avec la vitesse de la ligne et le type de la caténaire.

Pour ce projet, nous avons :

Tableau IV.2. Pentes maximales du fil de contact lors des changements de hauteur

Vitesse (km/h) ou type de caténaire		Pente maximale de raccordement mm/m (‰)	Différence maximale de pente entre 2 portées successives mm/m (‰)
25 000 ≻	$100 < V \leq 120$	4	2

❖ **Exemple d'application :**

Du PK25+146 au PK25+368, la hauteur du fil de contact passe de 5.50 m au 4.80m, ce qui nous donne une différence de pente entre les supports.

Nous avons :

- Vitesse de la ligne : 120 Km/h ;
- Pente maximale d'après la norme SNCF : P = 4‰ ;
- Valeur de dénivelée : d = $5.50 - 4.80 \quad \rightarrow \quad d = 0.7m = 700mm$;
- Longueur minimale théorique du raccordement : $L_T = \frac{d}{P} = \frac{700}{4} = 175\ m$;
- Longueur pratique du raccordement : $L_P = \frac{a_1}{2} + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + \frac{a_7}{2} \rightarrow L_P = 261.30\ m.$

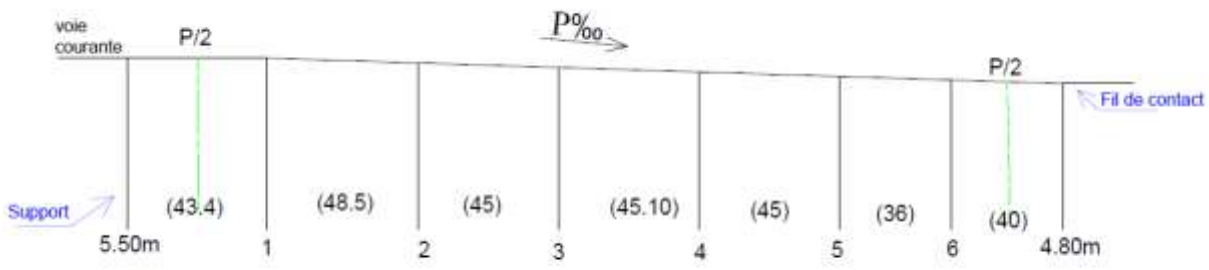


Figure IV.6. Changement de la hauteur du F.C en fonction de la pente

- Pente réelle : $P = \frac{d}{L_P} = \frac{700}{261.30} = 2.68\ mm/m$
- Hauteur du fil de contact aux supports 1, 2, 3, 4, 5 et 6 :

1er support : $H_{FC}^{1} = 5.5 - \frac{43.4 \times 1.34}{1000} = 5.44\ m$

2ème support :$H_{FC}^{2} = 5.44 - \frac{48.5 \times 2.68}{1000} = 5.31m$;

Donc : $H_{FC}^{3} = 5.18m$; $H_{FC}^{4} = 5.06\ m$; $H_{FC}^{5} = 4.94m\ et\ H_{FC}^{6} = 4.84m$

IV.6.5. Portées et position des supports aux abords des points singuliers du projet

Les portées peuvent être limitées selon les obstacles rencontrés le long de la voie ferroviaire. Cependant, chaque obstacle (autrement dit : point singulier) exigera une portée selon ses caractéristiques. Pour le présent projet, nous avons les cas suivants :

IV.6.5.1. Passage Supérieur

En fonction de la hauteur libre, de la largeur de l'ouvrage et de la hauteur minimale des fils de contact, on détermine la portée maximale admissible sous l'ouvrage.

Dans notre cas, la largeur de l'obstacle est supérieure à 9m avec la vitesse de la ligne de 160 Km/h, donc le franchissement se fait avec un passage libre avec mise en place de suspension sous l'ouvrage. De plus, la distance entre les supports encadrants est limitée et ne dépasse pas 54 m.

- Pour la position des supports, il faut laisser un minimum une distance de 3 mètres entre le support et le mur de retour du passage supérieur, afin de réserver la possibilité d'entretien le mur avec ouverture de fouilles.

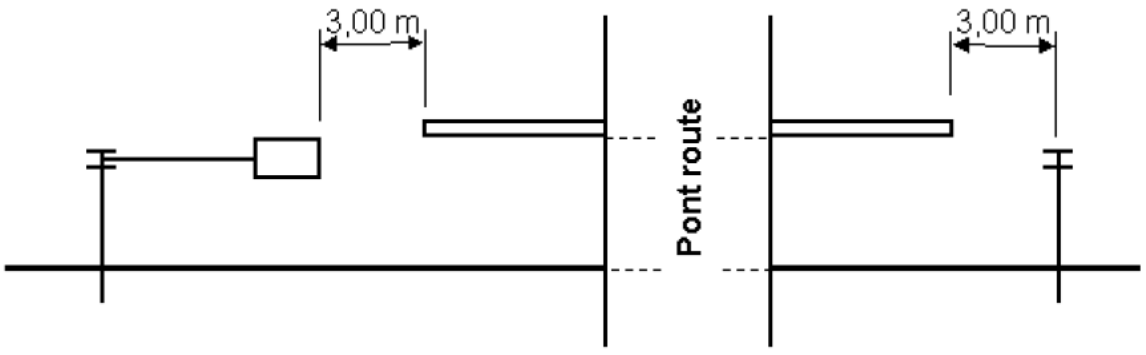


Figure IV.7. Position des supports par rapport au passage supérieur

IV.6.5.2. Branchement sur la voie principale

Le type d'équipement le plus couramment utilisé en voies principales est le Tangentiel. Ce type d'équipement impose la mise en place d'un support à proximité du centre de l'appareil de voie en respectant la distance maximale « P » fixée par la norme et la portée sur la voie déviée est en général égale à la portée sur la voie principale.

Avec :

- La zone hachurée « P » est la zone d'implantation du support ;
- C.A : Cœur d'appareil ;
- J.P.A : Joint de pointe apparent ;
- J.T : Joint de talon ;
- P.C : Pointe de cœur ;
- R : Rayon de la voie déviée ;
- T : Distance J.T. à P.C.

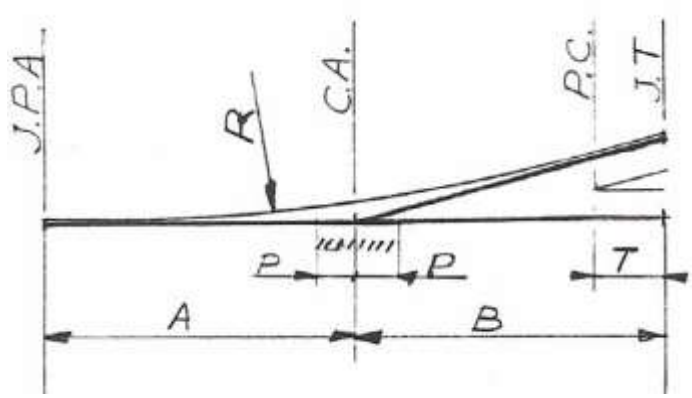


Figure IV.8. Branchement sur V.P

Un branchement se désigne par la valeur de la tangente de l'angle de déviation ; Alors pour calculer la distance "P", nous avons la formule suivante :

$$x = \frac{0.2}{tangente\ appareil\ de\ voie} \quad avec: \quad P = 2 \times x$$

(Voir Tableau A.2 en ANNEXE A pour plus de détails sur ces paramètres et leurs valeurs selon la norme).

IV.6.5.3. Voies de canalisations (gaz, eau, électricité)

Un support n'est jamais implanté sur une voie souterraine, il faut toujours prévoir une distance de trois mètres de part et d'autre qui permet de réserver la possibilité d'ouverture d'une tranchée.

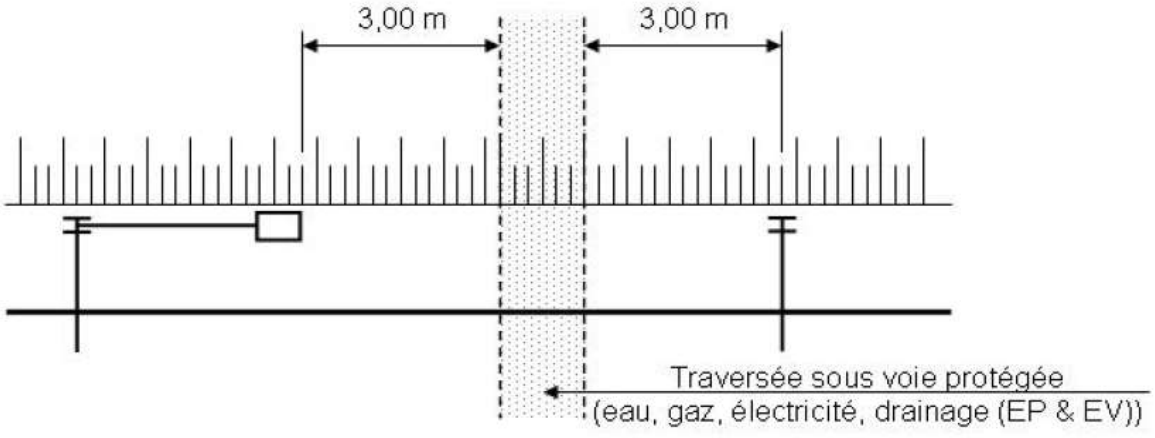


Figure IV.9. Position des supports par rapport à une voie souterraine

IV.6.5.4. Traversées électriques aériennes

En général, il ne faut pas prévoir de support sous une traversée aérienne sauf si celle-ci est très haute.

La position du support doit être telle que les agents d'entretien soient à la distance réglementaire de la traversée. On prévoit en général une distance de 4,00 m du fil le plus proche de la nappe de câbles aériens.

IV.6.5.5. Bâtiments voyageurs et les gares

a. Aux abords des bâtiments voyageurs

Les bâtiments voyageurs doivent être encadrés et le support le plus près à 7,00 m au minimum, afin de pouvoir installer un échafaudage et de respecter les règles de sécurité.

N.B : Les postes d'aiguillage, abris voyageurs, locaux de section, de brigade, etc., seront traités comme les bâtiments voyageurs.

b. Dans les gares

Il ne faut pas prévoir des supports :

- En face des passages planchéiés ;
- En face des accès routiers au quai (passage d'ambulance), ascenseur, escalier fixe ou mécanique ;
- En face des joints de pointes des branchements manœuvrés à pied d'œuvre (le support se trouverait alors à l'emplacement du levier de manœuvre) ;
- Dans les entrevoies des têtes de faisceaux (où les wagons déraillent plus fréquemment qu'ailleurs).

IV.6.5.6. Isolateur de section

Les portées intéressées par un isolateur de section sont inférieures ou égales à 54,00 m. En portée de 54,00 m, la distance entre le support et l'isolateur de section est de 13,50 m, mais elle peut être augmentée pour les portées inférieures.

IV.7. IMPLANTATION DES SUPPORTS

Transversalement, l'implantation est la distance entre l'axe de la voie et le nu du support. Pour le cas présent, et afin de permettre la visibilité d'un signal, l'implantation des supports de la caténaire devra être :

- Minimale : 3.00m ;
- Nominale : 3.50m.

IV.8. PRINCIPES D'ÉQUIPEMENT EN 25 KV

Une fois l'implantation des poteaux sur le plan le long du tracé est faite, on procédera à la détermination de la position des équipements suivant le schéma d'alimentation et sectionnement.

IV.8.1. Équipement tendeur "E.T"

Comme déjà expliqué en chapitre II (§.2.2.1), l'équipement tendeur est nécessaire pour assurer la tension mécanique. Pour chaque canton de caténaire de 700 à 1400m, cet équipement est placé à chaque extrémité et un dispositif d'anti-cheminement sera disposé au milieu de ce canton (support dont la console est rendue fixe par ancrage aux deux poteaux encadrants), tout en assurant la continuité électrique et celle du contact pantographe/ caténaire.

Quand les cantons de caténaire se succèdent, il y aura une partie de recouvrement entre eux ; et pour éviter que le pantographe frotte en même temps sur le fil de contact des deux cantons contigus, le fil est donc d'abord relevé au-dessus du plan de contact avant de pouvoir sortir du (ou entrer au) voisinage de l'axe de la voie.

- L'E.T est réalisé sur quatre portées, car pour ce projet, les portées sont entre 54m et 22.5m.
- Les valeurs de relèvement de la caténaire : $\begin{cases} r = 0.50\ m\ pour\ \ a = \ 63\ m. \\ r = 0.35\ m\ \ pour\ \ 54m \leq a < 63m \end{cases}$, avec "a" est la portée.

IV.8.2. Sectionnements

Les sectionnements seront en principe réalisés en 4 portées pour des portées de relèvement supérieures ou égales à 31,50 m et avec des désaxements particuliers.

On distingue deux types de sectionnements (les plus couramment utilisés) :

IV.8.2.1. Sectionnements à lame d'air

Ils sont réalisés en disposant côte à côte, sur une certaine longueur, les caténaires de deux cantons successifs. La continuité de captage au passage du pantographe est assurée par la présence d'une zone dite "commune" ou les plans de contact des deux caténaires sont distants de 0.50m de hauteur. La continuité électrique est assurée, au support d'axe, par un sectionneur ou interrupteur normalement fermé, relié aux deux caténaires par des appareils de coupures.

- **Sectionnement encadrant les gares**

Des sectionnements à lame d'air devront être installés en approche d'entrée des gares, et protégés avec des signaux d'entrée placés dans le sens normal des circulations.

IV.8.2.2. Isolateur de section

Il a la même fonction que le sectionnement à lame d'air mais a un encombrement bien moindre (et n'assure pas la fonction de tension mécanique), il est utilisé soit sur les voies parcourues à faibles vitesses, soit lorsqu'il n'est pas possible d'installer un sectionnement à l'âme d'air.

- Il existe plusieurs types d'isolateurs de section dont la forme dépend essentiellement de la vitesse à laquelle ils peuvent être franchis. Ces types sont détaillés en ANNEXE A.

Les plans de détails de "Sectionnement à lame d'air" et "Anti-cheminement" sont présentés en ANNEXE B.

IV.9. PENDULAGE

La réalisation des pendules entre le fil de contact et le câble porteur joue un rôle décisif au niveau de la qualité de contact dynamique et de la fiabilité du courant.

La longueur des pendules est calculée pour que le fil de contact ait une flèche, en milieu de portée, égale au 1/1000 de la portée, par rapport à une droite passant par la partie inférieure des pendules A et B et pour obtenir un encombrement de la caténaire au droit du support égal à 1.25 m. Le fil de contact a alors la forme d'une parabole passant par trois points obligés qui sont les points bas des pendules extrêmes et le milieu de portée.

- La longueur minimale des pendules doit être 300 mm. En cas de besoin de pendules plus courts, il est recommandé d'utiliser des pendules glissants.
- La distance entre les pendules au niveau de la portée est régulière et s'élève à 10 m au maximum.

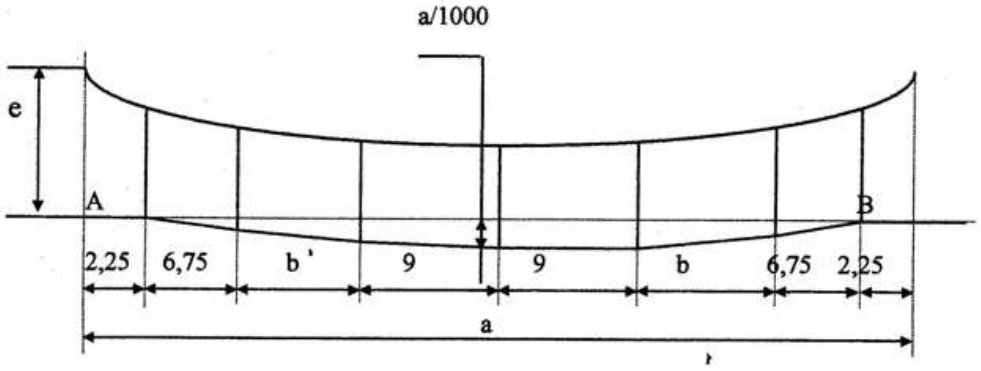


Figure IV.10. Les distances normalisées entre les pendules (Norme SNCF)

D'après la figure IV.10, il faut laisser une distance de 2.25m entre le support et le 1er pendule, et une distance de 6.75m entre le 1er et le 2ème pendule, ensuite, la distribution des autres pendules est faite symétriquement par la formule suivante :

$$a = 2 \times (2.25 + 6.75) + 9 \times x$$

Avec :

- a : Portée (donnée).

Pour la portée non multiple de 4.5m, elle sera diviser en x intervalles de 9m, ensuite le reste est à répartir entre b et b' symétriquement.

Cf. Tableau B.1 en ANNEXE B pour plus de détails sur la répartition des pendules en fonction de la portée.

IV.10. MISE SUR PLAN DE L'AVANT-PROJET DE PIQUETAGE

Après avoir implanté tous les supports en respectant toutes les règles mentionnées précédemment, le piquetage mis au point est reporté sur le plan continu au 1/1000ème, en respectant la position kilométrique des supports.

- Tous les supports seront repérés par un numéro provisoire, en principe le kilomètre dans lequel se situe le support suivi d'un numéro d'ordre. Les numéros impairs sont pour la voie N° 1 et les numéros pairs pour la voie N° 2.
- Le numéro d'ordre peut être suivi d'une (ou plusieurs) lettre(s) dans le cas des voies dédoublées et les voies de services.
- La valeur de la portée sera indiquée entre parenthèse suivi de la lettre f (flèches) pour les zones en raccordement parabolique ou en courbe.

Les deux parties du plan de piquetage sont présentées en détails en ANNEXE A.

IV.11. CONCLUSION

Après avoir présenté la variante de l'avant-projet de piquetage qui répond aux critères de ce projet, nous allons procéder, dans le prochain chapitre, à dimensionner les différents types des supports de la caténaire.

CHAPITRE V

"Dimensionnement des supports de la caténaire"

CHAPITRE V : DIMENSIONNEMENT DES SUPPORTS DE LA CATÉNAIRE

V.1. INTRODUCTION

Les poteaux et les portiques sont des supports qui doivent assurer le soutien structurel des éléments de suspension de la caténaire, dans l'orientation de la voie ferrée. Ce sont des éléments métalliques, habituellement en profilé type HE avec une hauteur minimale de huit mètres et maximale de quatorze mètres.

À travers ce chapitre, nous nous consacrerons au dimensionnement des différents supports de la caténaire.

V.2. NORMES ET RÈGLES DE CALCUL

- **Eurocode 3** : Calcul des structures en aciers ;
- **Eurocode 1** : Bases de calcul et actions sur les structures – Actions du vent ;
- **Eurocode 8** : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes ;
- **DTR RNV2013** : Règlement neige et vent (version 2013) ;
- **RPA 99 version 2003** : Règles parasismiques Algériennes.

V.3. PARAMÈTRES ET HYPOTHÈSES DE CALCUL

V.3.1. Paramètres climatiques

Tableau V.1. Conditions climatiques du projet

Température	Maximale	+80°C
	Ambiante	+50°C
	Minimale	-10°C
	Moyenne	+35°C
Vent	Vitesse normale	29 m/sec

V.3.2. Caractéristiques des caténaires

Tableau V.2. Caractéristiques des caténaires

	Porteur	**Fil de contact**	**Câble de retour traction**	**Feeder**	**Anti-cheminement**
Quantité	1	1	2	1 *****	1*****
Tension (daN) à 35°C sans vent	1200	1200	900× 2	900	1000
Diamètre (mm)	10.50	12.25	21.90× 2	21.90	10.50
Poids linéaire (daN/m)	0.605	0.951	0.987× 2	0.987	0.605

***** : Facultatif.

V.3.3. Caractéristiques du matériau "Acier"

Les aciers sont des alliages ferreux, obtenus par fusion d'un aggloméré de minerai de fer et de charbon et combinant aux deux éléments chimiques essentiels que sont le fer et le carbone (la teneur en carbone varie entre 0.05% et 2%). Selon la norme EN10 025 partie 2, il existe sept nuances retenues pour la charpente métallique.

La nuance d'acier utilisée pour les supports de ce projet est **S 275 JR**, ce qui signifie :

- S : Acier de construction ;
- $f_y = 275\ N/mm^2$: Résistance limite d'élasticité ;
- JR : Energie de rupture de 27 joules à +20°C (qualité vis-à-vis la rupture fragile).

Leurs caractéristiques mécaniques sont :

- ✓ Module d'élasticité longitudinale : E = 210 000 N/mm^2 ;
- ✓ Module d'élasticité transversale : G = 81 000 N/mm^2 ;
- ✓ Coefficient de poisson : $\nu = 0.3$;
- ✓ Masse volumique : $\rho = 7.8kg/m^3$.

Les profiles utilisés sont de la gamme HE (HEA, HEB ou HEM), qui ont des caractéristiques géométriques élevées dans les deux directions principales d'inertie.

V.3.4. Paramètres sismiques

Comme déjà expliqué en Chapitre III (§4.4), la banlieue Algéroise est classée "Zone sismique III, Groupe d'usage 2" ; Pour cela, le dimensionnement des supports doit donc tenir compte des efforts sismiques définis selon le type de la structure et la zone sismique considérée.

Le calcul des paramètres sismiques est détaillé par la suite.

V.4. DÉFINITION DES CHARGES

V.4.1. Charges permanentes

Les charges permanentes "G" sont des constantes dans le temps, qui sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau V.3. Les charges permanentes

Charges verticales	Charges horizontales
• Poids propre de chaque élément (support, console, caténaire …) ; • Effort axial de compression sur le support dû à un ancrage avec hauban.	**a. Perpendiculaire à l'axe de la voie** • Tension radiale sur les câbles due au désaxement, à la courbe de la voie ; • Ancrage des câbles transversaux. **b. Parallèles à l'axe de la voie** • Ancrage d'un câble sans hauban.

V.4.2. Charges variables climatiques

Les charges climatiques sont définies selon le règlement "RNV99/version 2013" ; Dans le cadre du présent projet, la charge de la neige (glace) sur les conducteurs n'est pas prise en compte, il nous reste uniquement les charges horizontales du vent, perpendiculaires ou parallèles à l'axe de la voie.

V.4.3. Charges sismiques

Le mouvement du sol peut se faire dans une direction quelconque dans le plan horizontal ; la force sismique équivalente totale V_0 est considérée appliquée indépendamment suivant les deux axes principaux x et y du plan horizontal. Le Règlement Parasismique Algérien recommande la distribution de cette force V_0 sur la hauteur de la structure.

V.5. MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement des supports est basé sur la théorie de la résistance des matériaux ; la méthode comprendra :

- La recherche, pour chaque type de support, d'un profil ayant des caractéristiques mécaniques suffisantes pour équilibrer les sollicitations dues aux charges permanentes, aux charges climatiques ainsi qu'aux charges sismiques (avec et sans pondération) ;
- La vérification des déplacements en tête du support et au niveau du fil de contact, pour qu'ils ne dépassent pas les valeurs admissibles ;
- La vérification de la résistance des supports vis-à-vis du flambement ;
- La vérification du risque de vrillage des supports équipés de plusieurs armements.

Pour les supports, trois types sont considérés :

1. Poteau indépendant en alignement ou en courbe, avec une ou deux consoles ;
2. Poteau d'ancrage ;
3. Portique.

V.6. DIMENSIONNEMENT D'UN SUPPORT INDÉPENDANT

V.6.1. Support avec une seule console

C'est un support avec un seul armement, situé en alignement ou en courbe. Le dimensionnement de celui-ci est fait en suivant les étapes mentionnées ci-dessus et en fonction de la portée et du désaxement de la ligne.

V.6.1.1. Orientation du support

Les supports, de type profilés en H, sont orientés avec les ailes parallèles à l'axe de la voie ; et sont encastrés en pied.

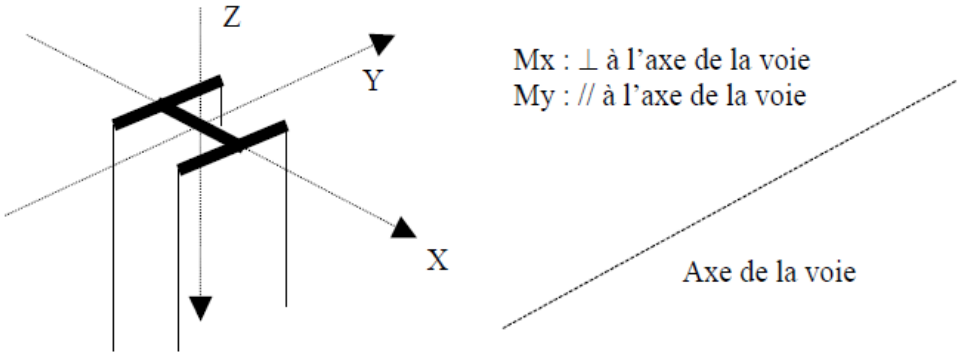


Figure V.1. Orientation du support

V.6.1.2. Évaluation des charges

Le support choisi comme exemple d'application est un poteau en alignement droit, non haubané et supporte deux portées de caténaire $a_1 = a_2 = 63m$, avec un désaxement $b_1 = +0.2m$ *et* $b_2 = -0.2m$.

Les charges sont calculées avec la valeur la plus défavorable de la température $\mathbf{T = -10°C}$.

V.6.1.2.1. Charges permanentes

a. Poids du support

Pour commencer, le profilé HE supposé pour le support à mettre en place est le **HEA 240**, par la suite, nous allons vérifier si ce profilé est le meilleur pour notre support vis-à-vis la stabilité et la résistance.

Le poids d'un profilé, aussi défini par unité de longueur, est calculé par la formule suivante :

$$W_S = P \times H$$

Avec :

- W_S : Poids du support en daN ;
- $P = 62.109\ daN/m$: Surface du profilé HEA 240 (d'après le catalogue) ;
- $H = 8.00m$: Hauteur du support.

$$\boldsymbol{W_S = 497\ daN}$$

b. Poids des câbles

Le poids d'un câble, normalement défini par unité de longueur, est exprimé en daN/m. Il est calculé par la formule suivante :

$$W_c = P \times L$$

Avec :

- W_c : Poids du câble en daN ;
- P : Poids du câble donné par le fournisseur en daN/m (Cf. Tableau V.2) ;
- L = $\frac{a_1+a_2}{2} = 63m$: Longueur de câble supportée par le support ;

Tableau V.4. Poids des câbles

Élément	Poids (daN/m)	Poids (daN)
Fil de contact	0.951× 63	60
Câble porteur	0.605× 63	38
Câble de retour traction	0.987× 2 × 63	62.2× 2

c. Poids des accessoires

Le poids des pièces diverses utilisées pour un montage donné est une des informations données dans les spécifications du fournisseur.

Pour l'ensemble armement (bras de console + isolateurs + bras de rappel + pièces de fixation des câbles), regroupant des pièces de matières différentes, on prend en compte un poids estimatif de **60 daN**.

d. Tensions radiales

La tension radiale est l'effort causé par la tension du câble sous l'effet d'un changement d'orientation. Cette force s'applique au point d'attache du câble.

La tension radiale causée par le désaxement ainsi que la courbe est donnée par la formule suivante :

$$T_{rad} = (\sum \left(\frac{d}{a}\right) + \sum \left(\frac{a}{2R}\right)) \times T$$

Avec :

- $\sum\left(\frac{d}{a}\right) \times T$: Tension radiale causée par le désaxement seulement ;
- $\sum\left(\frac{a}{2R}\right) \times T$: Tension radiale causée par le rayon de la courbe ;
- T_{rad} : Tension radiale ;
- T : Tension de calcul de câble considéré ;
- a : Portée de câble considéré ;
- $d = 0.4m$: Distance entre deux désaxements ;
- R : Rayon de la courbe.

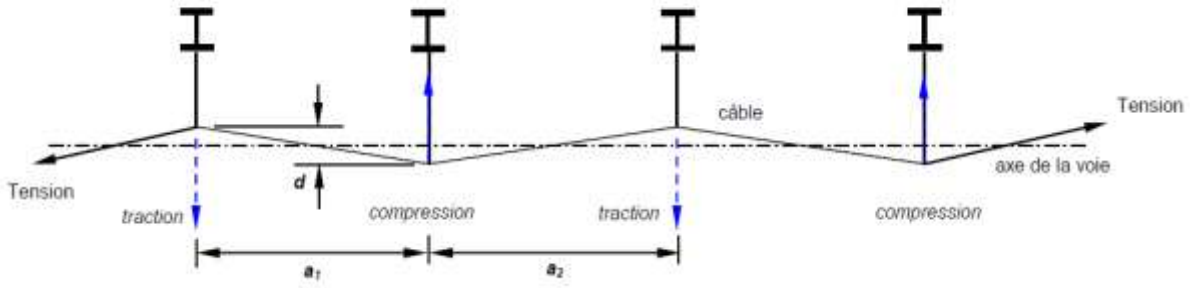


Figure V.2. Schéma explicatif de l'application de la tension radiale

- Nous avons choisi un exemple de calcul en alignement, pour cela, la tension radiale causée par le rayon de la courbe est négligée devant celle causée par le désaxement.
- Les câbles de retour électrique n'ont pas un désaxement mais ils peuvent changer leurs orientations s'ils rencontrent un obstacle ou un signal ; Pour cela, nous allons supposer que leur tension radiale égale à 0.1 daN.

Tableau V.5. Tension radiale pour chaque câble

Élément	T_{rad} (formule)	T_{rad} (daN)
Fil de contact	$(\frac{0.4}{63}) \times 2 \times 1200$	15.24
Câble porteur	$(\frac{0.4}{63}) \times 2 \times 1200$	15.24
Câble de retour traction	-	0.1× 2

V.6.1.2.2. Charges climatiques

a. Charge de vent perpendiculaire

L'effet du vent sur le support et les câbles, est assez prépondérant et a une grande influence sur la stabilité de celui-ci. Pour cela, les actions du vent seront calculées dans toutes les directions possibles. Dans le cadre de ce projet, nous avons une vitesse de vent de **29 m/s**, ce que nous donne une pression dynamique $\boldsymbol{q_w = 51.43\ daN/m^2}$ **(**calculée en chapitre IV (§6.1.5.1)). Alors, la charge de vent sur un élément se calcule par la formule suivante :

$$V_{\perp} = q_w \times d \times L \times C_t$$

Avec :

- V : Charge de vent ;
- $q_w = 51.43\ daN/m^2$: Pression dynamique du vent ;

- d : Diamètre d'un câble ou la largeur d'un élément pris perpendiculairement à la direction du vent ;
- L : Portée du câble ou la hauteur d'un élément ;
- C_t : Coefficient de traînée dépendant de la forme de la surface d'application de l'effort de vent.
  - Pour un profilé HE : $C_t = \gamma \times C_x$
    Avec :
    - γ : Coefficient aérodynamique dépendant du rapport longueur / largeur de la surface d'application et qui vaut 1.55 pour les poteaux caténaire en profilé **HE ;**
    - C_x : Coefficient aérodynamique dépendant de la direction du vent et qui vaut
      1.44 dans la direction à plus forte inertie du profilé → H
      0.93 Dans la direction à plus faible inertie du profilé → I
  - Pour les câbles : $C_t = \begin{cases} 1.25 \text{ pour le fil de contact} \\ 1.20 \text{ pour le cable porteur} \\ 1.00 \text{ pour les cables de retour électrique} \end{cases}$

Tableau V.6. Charge de vent pour chaque câble

Élément	$V_\perp$ (formule)	$V_\perp$ (daN)
Support	$51.43 \times (1.55 \times 1.44) \times 0.24 \times 8$	220.40
Fil de contact	$51.43 \times 0.01225 \times 63 \times 1.25$	50.00
Câble porteur	$51.43 \times 0.01050 \times 63 \times 1.20$	41.00
Câble de retour traction	$(51.43 \times 0.02190 \times 63 \times 1) \times 2$	71.00×2

b. Charge de vent parallèle

La charge de vent parallèle se calcule selon la même méthode citée plus haut. L'effet du vent parallèle sur les câbles est considéré négligeable.

V.6.1.2.3. Charges sismiques

Pour un support indépendant de hauteur de huit mètres, l'effet de séisme sur celui-ci est négligeable devant l'effet du vent. Le calcul des charges sismiques est réservé pour le portique.

V.6.1.3. Combinaisons de charges

Parmi les combinaisons données par l'EC3, les plus défavorables sont :

- **À l'ELU** : 1.35G +1.35R + 1.50W
- **À l'ELS** : 1.00G + 1.00R+1.00W

Avec : G → Charges permanentes ; R→ Tension radiale ; W → Vent.

- Après l'évaluation des charges, nous allons calculer les sollicitations pour déterminer à la fin les moments extrêmes.
- Les moments extrêmes seront déterminés au niveau de l'encastrement du support.
- Pour le calcul du moment des câbles, il faut tenir compte de l'arasement (distance entre le niveau de la fondation et le niveau du roulement) qui est égal à 0.40m.

Tableau V.7. Efforts appliqués sur le support et les câbles

Élément	Hauteur H (m)	Portée a (m)	Charges permanentes					Charges climatiques	
			Poids			Tension radiale		Vent ⊥	
			Distance horizontale d (m)	P (daN)	M_P (daN.m)	F_r (daN)	M_r (daN.m)	F_v (daN)	M_v (daN.m)
Support	8.00	63.00	-	497	-	-	-	220.4	882
Fil de contact	5.50	63.00	2.80	60	168	15.24	90	50	295
Câble porteur	6.75	63.00	2.80	38	106.4	15.24	109	41	293.15
Câble de retour traction	6.75	63.00	-0.11	62.2 × 2	-7 × 2	0.1 × 2	0.7 × 2	71 × 2	508 × 2
Armement	6.13	63.00	1.40	60	84	-	-	-	-
Total	-			779.4	344.4	30.68	200.4	453.4	2486.15

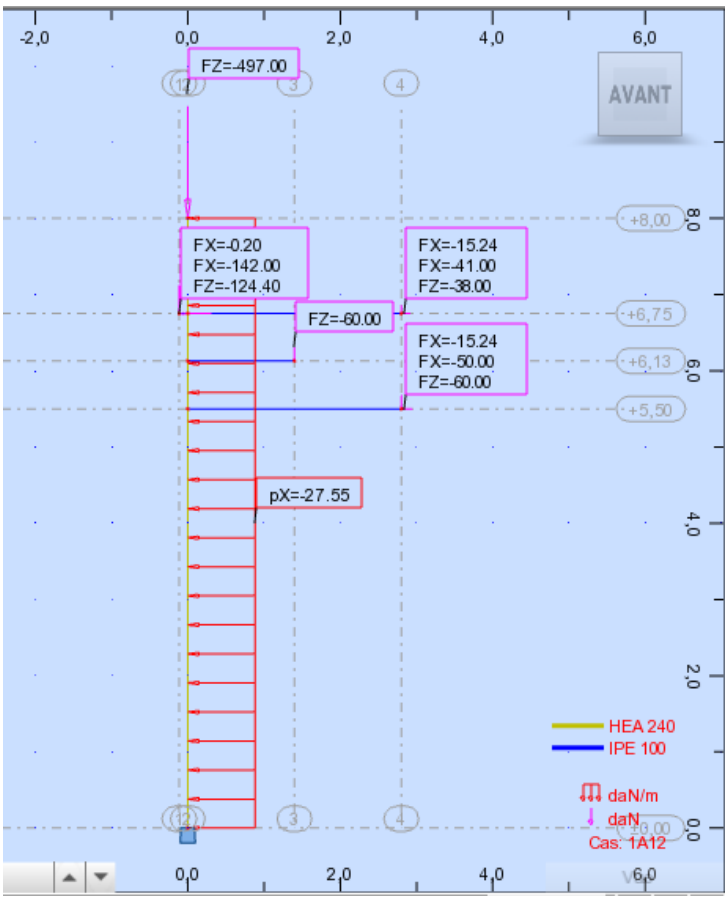


Figure V.3. Modèle du support avec les charges appliquées (ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS)

N.B : Les détails de la modélisation sont présentés en Annexe C.

Les sollicitations extrêmes sont les suivantes :

- **À l'ELU :** $\begin{cases} M_{sd} = 4464.7\ daN.m \\ N_{sd} = 1052.2\ daN \\ V_{sd} = 721.5\ daN \end{cases}$

- **À l'ELS :** $\begin{cases} M = 3030.95\ daN.m \\ N = 779.4\ daN \\ V = 484.1\ daN \end{cases}$

Avec : M → Moment fléchissant ; N→ Effort normal ; V → Effort tranchant.

V.6.1.4. Vérification des déplacements

La vérification des déplacements s'effectue à l'ELS (avec les charges non pondérées).

V.6.1.4.1. Flèches en tête de support dues aux charges permanentes

Avec le profilé supposé au départ, nous allons vérifier si les flèches en tête de support due aux charges permanentes restent inférieures à la flèche maximale admissible, c'est-à-dire :

$$\delta_H^{tot} < \delta_{adm}$$

Avec :

- $\delta_{adm} = 10.5\ cm$: Flèche maximale admissible en tête de support ;
- δ_H^{tot} : Flèche horizontale totale calculée en fonction des charges permanentes.

La flèche horizontale est donnée par la formule suivante : $\delta_H = \sum(\delta_H^M + \delta_H^F)$; tel que :

- La flèche due au moment M appliqué à une hauteur x : $\delta_H^M = \frac{10000 \times M \times x \times (2H - x)}{2E \times I}$
- La flèche due à la charge F appliqué à une hauteur x : $\delta_H^F = \frac{10000 \times F \times x^2 \times (3H - x)}{6E \times I}$

Avec :

- H : Hauteur totale du support ;
- x : Hauteur d'application de l'effort ou du moment ;
- $E = 21\ 000\ daN/mm^2$: Module d'élasticité longitudinale de l'acier ;
- $I = 7763\ cm^4$: Moment d'inertie perpendiculaire (suivant l'axe fort).

Tableau V.8. Flèche en tête de support dues aux charges permanentes

Élément	Fil de contact	Câble porteur	Armement	Câble de retour traction
Flèche δ_H (cm)	0.41	0.35	0.16	0.00

Alors : $\delta_H^{tot} = \sum \delta_H = 0.92\ cm < \delta_{adm} = 10.5\ cm$ → **la condition est vérifiée.**

V.6.1.4.2. Flèche au niveau du fil de contact dû aux charges de vent

La flèche au niveau du fil de contact ne doit pas dépasser la flèche admissible donnée par la norme et est égale à 5.5 cm. Autrement dit :

$$\delta_h^{tot} = \sum \delta_h < \delta_{adm}$$

La flèche due aux charges de vent est donnée par les formules suivantes :

- Pour une charge répartie q : $\delta_h = \frac{10000 \times q \times H^2}{24EI} \times (6H^2 - 4H \times h + h^2)$
- Pour une charge F appliquée à une hauteur x<h : $\delta_h = \frac{10000 \times F \times h^2}{6EI} \times (3h - x)$

Avec :

- h : Hauteur du fil de contact.

Tableau V.9. Flèche au niveau du fil de contact due aux charges de vent

Élément	Support	Fil de contact	Câble porteur	Armement	Câble de retour traction
Flèche δ_h (cm)	1.04	0.21	0.23	-	0.39 × 2

Alors : $\delta_h^{tot} = \sum \delta_h = 2.26\ cm < \delta_{adm} = 5.5\ cm$ → **la condition est vérifiée.**

V.6.1.4.3. Contre flèche

Les poteaux seront montés avec une contre-flèche calculée sur la base de la flèche au sommet du poteau sans vent, dans le but de compenser celle-ci et d'assurer une parfaite verticalité des mâts. Cette contre-flèche sera faite à côté de la voie ou à l'extérieure de celle-ci ; La contre-flèche est considérée comme positive lorsqu'elle est réalisée à l'extérieur de la voie et négative dans le cas contraire. Les valeurs de la contre-flèche sont données dans le tableau V.10 :

Tableau V.10. Les valeurs de la contre flèche en fonction de la flèche

Flèche calculée en tête de support (cm)	Contre flèche appliquée au support (cm)
$\mathbf{0 \leq \delta_H \leq 1.5}$	$C_f = 0$
$\mathbf{1.5 < \delta_H \leq 4.5}$	$C_f = 3$
$\mathbf{4.5 < \delta_H \leq 7.5}$	$C_f = 6$
$\mathbf{7.5 < \delta_H \leq 10.5}$	$C_f = 9$

Pour le support considéré, nous avons une flèche $\delta_H^{tot} = 0.92\ cm < 1.5$ → $\boldsymbol{C_f = 0}$.

V.6.1.5. Classification de la section

Avant d'entamer la partie vérification, il faut classer la section **HEA 240**, avec les caractéristiques suivantes :

$$\boldsymbol{HEA\ 240}: \begin{cases} b = 240mm \\ t_w = 7.5mm \\ t_f = 12mm \\ d = 164mm \\ r = 21mm \\ \varepsilon = \sqrt{\dfrac{235}{f_y}} = 0.92 \end{cases}$$

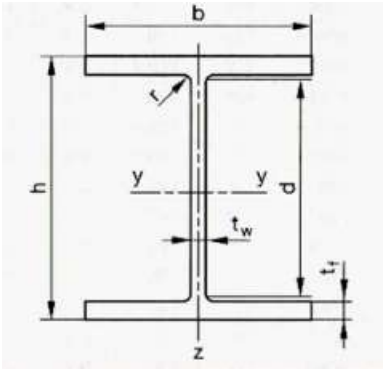


Figure V.4. Section HE

- Classification de l'âme

Nous avons : $\frac{d}{t_w} = \frac{164}{7.5} = 21.87 < 33\varepsilon$ → l'âme est de classe I.

- Classification de la semelle

Nous avons : $\frac{C}{t_f} = \frac{\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r}{t_f} = \frac{95.25}{12} = 7.98 < 9\varepsilon$ → la semelle est de classe I.

$\Longrightarrow$ La section est de classe **I**.

V.6.1.6. Vérification de la résistance du support

Le support travaille en flexion composée, il faut donc vérifier :

$$M_{sd} \leq M_{N,Rd}$$

Avec :

- $M_{sd} = 4464.7\ daN.m$: Moment sollicitant à l'ELU ;
- $M_{N,Rd}$: Moment de résistance plastique réduit par la prise en compte de l'effort axial :

$$M_{N,Rd} = \frac{M_{pl,Rd}(1-n)}{1-0.5a} = \frac{w_{ply} \times f_y}{\gamma_{M0}} \times \frac{1-n}{1-0.5a}$$

Tel que :

- $w_{ply} = 744.6\ cm^3$: Module d'inertie plastique de la section HEA 240 ;
- $\gamma_{M0} = 1.1$: Coefficient de sécurité partiel ;
- $n = \frac{N_{sd}}{N_{pl,Rd}} = \frac{N_{sd} \times \gamma_{M0}}{A \times f_y}$: Rapport entre l'effort normal sollicitant de calcul et l'effort normal plastique ;
  - $N_{sd} = 1052.2\ daN = 10.52\ KN$: Effort normal sollicitant de calcul ;
  - $A = 76.8\ cm^2$: Aire de la section HEA 240 ;

$$n = \frac{10.52 \times 1.1}{76.8 \times 27.5} \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{n = 0.0055}$$

- $a = \min(\frac{A_w}{A}; 0.5)$, tel que : $A_w = A - 2b \times t_f = 19.2\ cm^2 \ \rightarrow a = \min(\frac{19.2}{76.8}; 0.5)$

$$\rightarrow\ a = \min(0.25; 0.5)\ \rightarrow\ \boldsymbol{a = 0.25}$$

Alors : $M_{N,Rd} = \frac{744.6 \times 275 \times 10^{-3}}{1.1} \times \frac{1-0.0055}{1-0.5 \times 0.25}\ \rightarrow\ M_{N,Rd} = 211.57\ KN.m = 21157\ daN.m$

$M_{sd} = 4464.7\ daN.m < M_{N,Rd} = 21157\ daN.m \quad \Longrightarrow$ **Condition vérifiée**.

V.6.1.7. Vérification de la résistance du support vis-à-vis du flambement

Tant que le support est soumis à un effort normal de compression, il faut donc vérifier sa résistance au flambement. Le risque du flambement est considéré si l'élancement réduit $\bar{\lambda}$ est supérieur à 0.2 ; Dans ce cas, il faut vérifier :

$$N_{sd} \leq N_{b,Rd}$$

Tel que :

- $N_{b,Rd} = \frac{\chi_{min} \times \beta_A \times A \times f_y}{\gamma_{M1}}$: Effort résistant au flambement ;
- $\beta_A = 1$: Pour les sections de classe 1, 2 et 3 ;
- $\gamma_{M1} = 1.1$: Coefficient de sécurité partiel ;
- $\chi_{min} = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}}$: Coefficient de réduction dépend de l'élancement réduit $\bar{\lambda}$;
- $\varphi = 0.5\left[1 + \alpha \times (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2\right]$;
- α : Facteur d'imperfection dépend de la courbe de flambement ;

- $\bar{\lambda} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_1}\right)\sqrt{\beta_A} = \frac{\lambda}{93.9\varepsilon}$: Élancement réduit ;
- λ : Élancement calculé à la base des caractéristiques de la section brute :

$$\begin{cases} \frac{h}{b} = \frac{230}{240} = 0.96 < 1.2 \\ t_f = 12mm < 100mm \end{cases} \rightarrow \begin{cases} Axe\ de\ flambement \rightarrow \begin{cases} (y-y) \\ (z-z) \end{cases} \\ Courbe\ de\ flambement \rightarrow \begin{cases} b \\ c \end{cases} \end{cases}$$

- Sur le plan (y-y) :

Avec la courbe (b), nous avons : $\alpha = 0.34$ (Cf. tableau C.1 en ANNEXE C).

$$\lambda_y = \frac{l_f}{i_y} = \frac{2 \times H}{\sqrt{\frac{I_y}{A}}} = \frac{2 \times 800}{\sqrt{\frac{7763}{76.8}}} = 159.2 \rightarrow \overline{\lambda_y} = \frac{\lambda_y}{93.9\varepsilon} = \frac{159.2}{86.34} = 1.84$$

- Sur le plan (z-z) :

Avec la courbe (c), nous avons : $\alpha = 0.49$

$$\lambda_z = \frac{l_f}{i_z} = \frac{2 \times H}{\sqrt{\frac{I_z}{A}}} = \frac{2 \times 800}{\sqrt{\frac{2769}{76.8}}} = 266.5 \rightarrow \overline{\lambda_z} = \frac{\lambda_z}{93.9\varepsilon} = \frac{266.5}{86.34} = 3.09$$

Alors : $\bar{\lambda} = \max(\overline{\lambda_y}; \overline{\lambda_z}) = 3.09 \Longrightarrow \chi_{min} = 0.0952$

Donc : $N_{b,Rd} = \frac{0.0952 \times 1 \times 7680 \times 275 \times 10^{-3}}{1.1} = 182.78\ KN = 18278\ daN$

$$N_{sd} = 1052.2\ daN < N_{b,Rd} = 18278\ daN \Longrightarrow \textbf{Condition vérifiée}.$$

V.6.1.8. Vérification de la résistance du support au déversement

Le déversement est un phénomène d'instabilité susceptible d'intervenir dans les barres fléchies par rapport à leur axe de forte inertie ; sous l'effet de la flexion, une partie de la section est comprimée et l'autre tendue. La zone comprimée tend à flamber latéralement, et la zone tendue tend à s'opposer à ce déplacement latéral ; le déversement est aussi accompagné d'une rotation des sections, cette rotation fait intervenir les caractéristiques de rigidité à la torsion de la barre.

Il faut vérifier que : $M_{sd} \leq M_{b,Rd}$

Avec :

- $M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \times \beta_w \times w_{ply} \times f_y}{\gamma_{M1}}$: Moment résistant au déversement ;
- $\beta_w = 1$ pour les sections de classe 1, 2 et 3 ;
- $\chi_{LT} = \frac{1}{\emptyset_{LT} + \sqrt{\emptyset_{LT}^2 - \overline{\lambda_{LT}}^2}} \leq 1$: Facteur de réduction pour le déversement ;
- $\emptyset_{LT} = 0.5\left[1 + \alpha_{LT}\left(\overline{\lambda_{LT}} - 0.2\right) + \overline{\lambda_{LT}}^2\right]$: Courbe de flambement ;
- $\alpha_{LT} = 0.21$ (pour un profilé laminé) : Facteur d'imperfection ;
- $\overline{\lambda_{LT}} = \sqrt{\frac{\beta_w \times w_{ply} \times f_y}{M_{cr}}}$: Élancement réduit du déversement ;

- M_{cr} : Moment critique de déversement donné par la formule suivante

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times EI_z}{L^2} \times \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \times G \times I_t}{\pi^2 \times EI_z}}$$

  - $C_1 = 1.132$: Coefficient dépend de la charge répartie ;
  - $G = 8.1 \times 10^6\ N/cm^2$: Module d'élasticité transversale ;
  - $I_t = 41.55\ cm^4$: Moment d'inertie de torsion ;
  - $I_w = 328.5 \times 10^3 cm^6$: Moment d'inertie de gauchissement ;
  - $I_z = 2769\ cm^4$: Moment d'inertie de flexion suivant l'axe de faible inertie ;

$$M_{cr} = 1.132 \times \frac{\pi^2 \times 21 \times 10^6 \times 2769}{800^2} \times \sqrt{\frac{328.5 \times 10^3}{2769} + \frac{800^2 \times 8.1 \times 10^6 \times 41.55}{\pi^2 \times 21 \times 10^6 \times 2769}}$$

$$\boldsymbol{M_{cr} = 22546341.25\ N.cm}$$

$$\begin{cases} \overline{\lambda_{LT}} = \sqrt{\dfrac{1 \times 744.6 \times 275 \times 10^2}{22546341.25}} = 0.95 \\ \emptyset_{LT} = 0.5[1 + 0.21(0.95 - 0.2) + 0.95^2] = 1.03 \end{cases} \rightarrow \chi_{LT} = \frac{1}{1.03 + \sqrt{1.03^2 - 0.95^2}} = 0.70$$

Alors :

$$M_{b,Rd} = \frac{0.70 \times 1 \times 744.6 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{1.1} \rightarrow \boldsymbol{M_{b,Rd} = 130.31\ KN.m = 13031\ daN.m}$$

Donc :

$$M_{sd} = 4464.7\ daN.m < M_{b,Rd} = 13031\ daN.m \quad \Longrightarrow \quad \textbf{Condition vérifiée.}$$

V.6.1.9. Vérification de la résistance du support au voilement par cisaillement

Le voilement est une instabilité qui se produit au niveau des parois d'une section par compression ou par cisaillement.

La présence de l'effort tranchant au niveau de la section, provoque le voilement de l'âme par cisaillement ; Pour cela, il faut vérifier l'inégalité suivante :

$$\frac{d}{t_w} \leq 69\varepsilon \rightarrow \frac{164}{7.5} = 21.86 < 69 \times 0.92 = 63.48$$

$\Longrightarrow$ Donc, il n'y a pas lieu de vérifier le voilement par cisaillement avec cette section.

V.6.1.10. Taux de travail du support

Le taux de travail d'un support est un paramètre décisif dans le choix de la section de celui-ci vis-à-vis de la durabilité ; Il est donné par la formule suivante :

$$\tau = \frac{\sigma_{ser}}{\sigma_{adm}} \times 100$$

Avec :

- $\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{\gamma} = \frac{275}{1.8} = 152.8\ N/mm^2$: Contrainte admissible de l'acier ;

- σ_{ser}: Contrainte de service calculée avec les efforts internes.

Le taux de travail pour le support HEA 240 égale à **43%**.

N.B : Quel que soit le type du support, le taux de travail ne doit pas dépasser 70%.

- Après toutes ces vérifications, nous avons conclu que le profilé choisi **HEA 240**, convient comme support en alignement avec une seule console.

V.6.2. Support avec deux consoles

Un support avec deux consoles est un poteau intermédiaire au niveau de la section de caténaire dédoublée et de sectionnement à lame à air sur trois ou quatre portées.

Pour ce type de support, le profilé proposé est le **HEB** en raison d'existence d'un effort de torsion important ; Ce dernier engendre une vérification supplémentaire du risque de vrillage du support.

La démarche et les formules utilisées pour de dimensionnement du support seront simplifiées sous forme d'un programme Excel et la note de calcul sera présentée en ANNEXE D, afin d'éviter le calcul répétitif.

- Le support choisi comme exemple d'application est le poteau de sectionnement à lame d'air N°24-07 (voir le plan de piquetage N°01), en alignement droit et supporte deux portées de caténaire $a_1 = 33m\ et\ a_2 = 36m$.

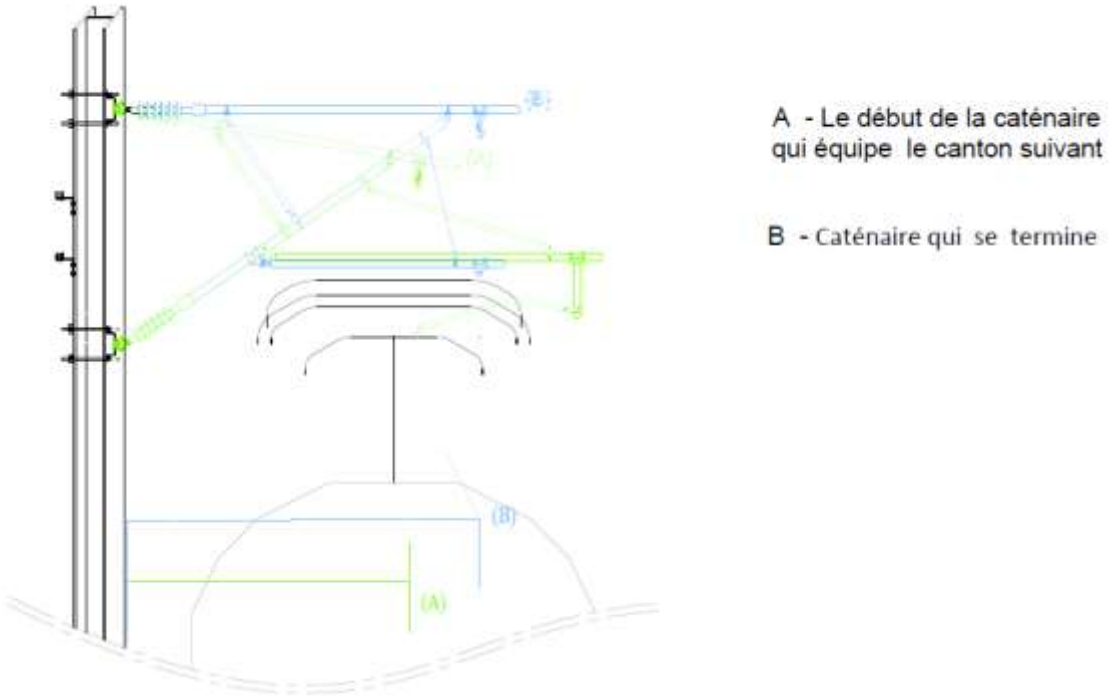


Figure V.5. Poteau avec 02 consoles

- La différence entre le support avec une seule console et celui avec deux consoles se présente dans les désaxements et la hauteur de la caténaire ; Pour cet exemple, nous avons :

Tableau V.11. Désaxements et hauteur de la caténaire pour le support avec 02 consoles

	Élément	Désaxement	Hauteur (m)
Caténaire 1 (ancienne)	Fil de contact	$b_1 = -0.2m$ $b_2 = +0.2m$	5.50
	Câble porteur		6.75
Caténaire 2 (nouvelle)	Fil de contact	$b_1 = 0\ (ancrage)$	5.50 +r* = 6.00
	Câble porteur	$b_2 = +0.65m$	7.65

* : Relèvement = 0.5 m.

V.6.2.1. Évaluation des charges

Pour commencer, le profilé HE supposé pour notre support est le **HEB 240**, par la suite, nous allons vérifier si ce profilé est le meilleur pour notre support vis-à-vis la stabilité et la résistance.

V.6.2.1.1. Charges permanentes et charges climatiques

Tableau V.12. Charges permanentes et climatiques de support et les 02 consoles

	Charges permanentes		Charges climatiques
Élément	Poids (daN)	T_{rad} (daN)	$V_{\perp}$ (daN)
Support HEB 240	686	-	220.4
Fil de contact × 2	33	45.7	27
Câble porteur × 2	21	45.7	23
Armement× 2	60	-	-
Câble de retour traction× 2	34	0.1	39

Tableau V.13. Efforts appliqués sur le support et les 02 consoles

			Charges permanentes					Charges climatiques	
	Élément	**Hauteur H (m)**	**Poids**			**Tension radiale**		**Vent ⊥**	
			Distance horizontale d (m)	P (daN)	M_P (daN.m)	F_r (daN)	M_r (daN.m)	F_v (daN)	M_v (daN.m)
	Support HEB 240	8.00	-	686	-	-	-	220.4	882
Caténaire 01	Fil de contact	5.50	2.80	33	92	45.7	270	27	160
	Câble porteur	6.75	2.80	21	58	45.7	327	23	166
Caténaire 02	Fil de contact	6.00	2.80	33	92	45.7	293	27	174
	Câble porteur	7.65	2.80	21	58	45.7	368	23	187
	C. retour traction× 2	6.75	-0.11	34	-4	0.1	0.7	39	277
	Armement × 2	6.13	1.40	60	84	-	-	-	-
	Total	-		982	460	183	1259.4	398.4	2123

Les sollicitations extrêmes sont les suivantes :

- **À l'ELU :** $\begin{cases} M_{sd} = 5505.7\ daN.m \\ N_{sd} = 1325.7\ daN \\ V_{sd} = 844.65\ daN \end{cases}$
- **À l'ELS :** $\begin{cases} M = 3842.4\ daN.m \\ N = 982\ daN \\ V = 581.4\ daN \end{cases}$

V.6.2.2. Vérification des déplacements

Tableau V.14. Flèches dues aux charges permanentes et aux charges de vent

		Caténaire 01		Caténaire 02				
	Support	**FC 1**	**CP 1**	**FC 2**	**CP 2**	**Armement× 2**	**CRT × 2**	**Total**
$\boldsymbol{\delta_H}$ **(cm)**	-	0.32	0.36	0.35	0.41	0.11	0.00	**1.66**
$\boldsymbol{\delta_h}$ **(cm)**	0.31	0.08	0.09	0.09	0.10	-	0.15	**0.97**

- **Vérification de la flèche en tête de support due aux charges permanentes**

$\delta_H^{tot} = \sum \delta_H = 1.66\ cm < \delta_{adm} = 10.5\ cm$ → **La condition est vérifiée.**

- **Vérification de la flèche au niveau du fil de contact due aux charges de vent**

$\delta_h^{tot} = \sum \delta_h = 0.97\ cm < \delta_{adm} = 5.5\ cm$ → **La condition est vérifiée.**

- **Contre flèche**

Nous avons : $1.5 < \delta_H^{tot} = 1.66\ cm < 4.5$ → $\boldsymbol{C_f = 3cm}$.

V.6.2.3. Vérification de la résistance du support

La section **HEB 240** est de classe **I** avec les caractéristiques suivantes :

$$\boldsymbol{HEB\ 240}: \begin{cases} b = 240mm \\ t_w = 10mm \\ t_f = 17mm \\ d = 164mm \\ r = 21mm \\ \varepsilon = \sqrt{\dfrac{275}{f_y}} = 0.92 \end{cases}$$

N.B : Les étapes de vérification sont identiques à celles du support avec une seule console.

Tableau V.15. Paramètres de vérification de flexion simple (support avec 02 consoles)

Paramètre	$\boldsymbol{w_{ply}\ (cm^3)}$	$\boldsymbol{\gamma_{M0}}$	**A (cm²)**	$\boldsymbol{A_w}$ **(cm²)**	$\boldsymbol{n}$	$\boldsymbol{\alpha}$
Valeur	1053	1.1	106	24.4	0.05	0.23

Alors, nous avons : $\begin{cases} M_{sd} = 5505.7\ daN.m \\ M_{N,Rd} = 29597\ daN.m \end{cases}$ → $M_{sd} < M_{N,Rd}$ **la condition est vérifiée**.

V.6.2.4. Vérification de la résistance du support vis-à-vis du flambement

Tableau V.16. Paramètres de vérification de flambement (support avec 02 consoles)

Paramètre	β_A	γ_{M1}	λ	$\bar{\lambda}$	χ_{min}
Valeur	1	1.1	$\begin{cases}\text{Plan (y}-\text{y)} : \lambda_y = 155.24 \\ \text{Plan (z}-\text{z)} : \lambda_z = 263\end{cases}$	$\bar{\lambda} = max\begin{cases}\overline{\lambda_y} = 1.78 \\ \overline{\lambda_z} = 3.03\end{cases} = 3.03$	0.0976

Alors, nous avons : $\begin{cases}N_{sd} = 1325.7\ daN \\ N_{b,Rd} = 25864\ daN\end{cases} \rightarrow N_{sd} < N_{b,Rd}$ **la condition est vérifiée.**

V.6.2.5. Vérification de la résistance du support au déversement

Tableau V.17. Paramètres de vérification de déversement (support avec 02 consoles)

Paramètre	β_w	γ_{M1}	Moment d'inertie I	C_1	Moment critique M_{cr} (N.cm)	$\overline{\lambda_{LT}}$	$\emptyset_{LT}$	χ_{LT}
Valeur	1	1.1	$\begin{cases}I_t = 102.7cm^4 \\ I_w = 486.9 \times 10^3 cm^6 \\ I_z = 3923cm^4\end{cases}$	1.132	40113343.4	0.85	0.93	0.76

Alors, nous avons : $\begin{cases}M_{sd} = 5505.7\ daN.m \\ M_{b,Rd} = 20007\ daN.m\end{cases} \rightarrow M_{sd} < M_{b,Rd}$ **la condition est vérifiée**.

V.6.2.6. Vérification de la résistance du support au voilement par cisaillement

Il faut vérifier la condition suivante :

$$\frac{d}{t_w} \leq 69\varepsilon \rightarrow \frac{164}{10} = 16.4 < 69 \times 0.92 = 63.48$$

$\Longrightarrow$ Donc, il n'y a pas lieu de vérifier le voilement par cisaillement avec cette section.

V.6.2.7. Vérification du risque de vrillage des supports

Cette vérification supplémentaire ne concerne que les supports équipés de plusieurs armements. Afin de limiter les déformations permanentes, en phase de montage à l'occasion du déroulage et de la mise en tension des câbles ainsi qu'en phase définitive à l'ajustement des câbles dans les pinces de fixation, l'angle de torsion φ ne doit pas dépasser les valeurs suivantes :

$$\begin{cases}\text{En phase travaux: } \varphi < 0.2\ rad \\ \text{En phase finale: } \varphi < 0.1\ rad\end{cases}$$

Chaque armement sera assimilé à un système triangulaire, tel que les charges permanentes (le poids et la tension radiale des câbles) qui s'y exercent, se traduisent au niveau des appuis sur les traverses supérieure et inférieure par des efforts horizontaux perpendiculaires à la voie (comme la figure V.5 le montre).

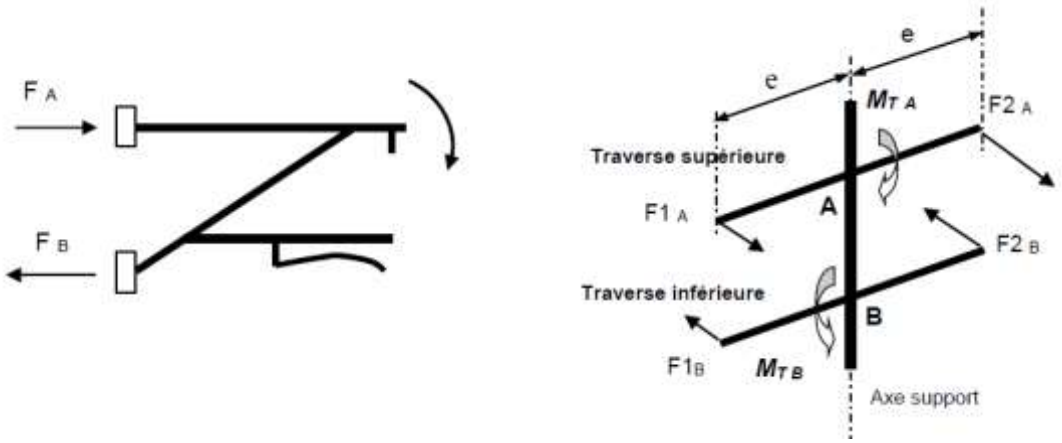


Figure V.6. Efforts appliqués sur les 02 consoles

L'excentricité "e" par rapport à l'axe du support (égale à 0.5m pour les supports intermédiaires) crée un moment de torsion distinct à chaque hauteur de traverse sur la section du profil.

Les moments de torsion seront calculés en appliquant les formules suivantes :

$$\begin{cases} M_{T/A} = \sum F_A \times e \\ M_{T/B} = \sum F_B \times e \end{cases}$$

Tableau V.18. Valeurs des forces et moments de torsion (Support avec 02 consoles)

	F_A (daN)	F_B (daN)	e (m)	$M_{T/A}$ (daN.m)	$M_{T/B}$ (daN.m)
Caténaire 01	-248	157	0.50	-241	150
Caténaire 02	-234	143	0.50		

- L'angle de torsion au niveau de la traverse supérieure se calcule par la formule :

$$\omega_A = \frac{M_{T/A} \times H_A + M_{T/B} \times H_B}{G \times I_t}$$

- L'angle de torsion au niveau de la traverse inférieure se calcule par la formule :

$$\omega_B = \frac{(M_{T/A} + M_{T/B}) \times H_B}{G \times I_t}$$

Avec :

- $\omega_A \; et \; \omega_B$: Angles de torsion en radian, respectivement aux points A et B ;
- $M_T \; (daN.m)$: Moment de torsion ;
- $H_A = 7m$: Hauteur de la traverse supérieure ;
- $H_B = 5.69m$: Hauteur de la traverse inférieure ;
- $G = 8.1 \times 10^9 \; daN/m^2$: Module d'élasticité transversale ;
- $I_t = 102.7 \times 10^{-8} m^4$: Moment d'inertie de torsion.

Nous avons : $\begin{cases} \omega_A = -0.001 \; rad \\ \omega_B = 0.0001 \; rad \end{cases} < \begin{cases} \varphi = 0.2 \; rad \; (en \; phase \; travaux) \\ \varphi = 0.1 \; rad \; (en \; phase \; finale) \end{cases}$

→ Il n′y a pas de risque de vrillage pour le support HEB 240 à 02 consoles.

V.6.2.8. Taux de travail du support

Le support à 02 consoles avec la section HEB 240 a un taux de travail égal à **51%**.

- Après toutes ces vérifications, nous avons conclu que le profilé choisi **HEB 240**, convient comme support en alignement avec deux consoles. (Cf. feuille de calcul Excel en ANNEXE C).

V.6.3. Support d'ancrage

Certains poteaux comportent un ancrage au sol. Ce dispositif permet de ne pas faire subir un fléchissement important au support lorsqu'une extrémité de caténaire (appareil tendeur, ancrage fixe, anti-cheminement, fin de caténaire sur voie en impasse, etc…) est fixée sur le poteau.

La particularité de ce type de support est l'existence des câbles d'ancrage (pour le fil de contact et le câble porteur), des appareils tendeurs et des contrepoids.

La section de support est supposée en HEA, car il n'y a pas un risque de vrillage sur celui-ci.

- Le support choisi comme exemple d'application est un poteau d'ancrage pour un sectionnement N°24-05 (voir le plan de piquetage N°01), en alignement droit et supporte deux portées de caténaire $a_1 = a_2 = 33m$. Le tableau V.19 résume les données d'entrée :

Tableau V.19. Données de calcul pour le support d'ancrage

	L (m)	H (m)	$\sum d/a\perp$	d' (m)
Fil de contact	$\frac{a_1 + a_2}{2} = 33$	5.50	0.025	2.80
Câble porteur	33	6.75	0.025	2.80
Ensemble armement	-	6.13	-	1.40
Câble retour traction × 2	33	6.75	0	-0.11
Ancrage fil de contact	$\frac{a_1}{2} = 16.5$	6.00	0.068	0
Ancrage câble porteur	16.5	7.25	0.068	0
Contrepoids 240daN × 2	-	4.00	-	0
Appareil tendeur × 2	-	6.25	-	0

Avec :

- L : Longueur de câble supportée par le support ;
- $\sum \frac{d}{a} = \frac{implantation}{portée} = \frac{2.25}{33}$: Pour les câbles d'ancrage ;
- d' : Distance horizontale entre l'élément et l'axe du support.

V.6.3.1. Évaluation des charges

La section supposée pour ce type de support est la **HEA 260** (HEA 240 donne un taux de travail du support élevé).

V.6.3.1.1. Charges permanentes et charges climatiques

Tableau V.20. Charges permanentes et climatiques de support d'ancrage HEA 260

	Charges permanentes			Charges climatiques
Élément	Poids (daN/m)	Poids (daN)	T_{rad} (daN)	$V_{\perp}$ (daN)
Support HEA 260	70.246	562	-	239
Fil de contact	0.951	31.4	29.5	26
Câble porteur	0.605	20	29.5	22
Armement	-	60	-	-
Câble de retour traction× 2	0.987	33	0.2	37
Ancrage fil de contact	0.951	1231 !	81.6	13
Ancrage câble porteur	0.605	1225 !	81.6	11
Contrepoids 240daN × 2	-	480	-	30
Appareil tendeur × 2	-	80	-	60

Tableau V.21. Efforts appliqués sur le support d'ancrage HEA 260

		Charges permanentes					Charges climatiques	
Élément	**Hauteur H (m)**	**Poids**			**Tension radiale**		**Vent ⊥**	
		Distance horizontale d (m)	P (daN)	M_P (daN.m)	F_r (daN)	M_r (daN.m)	F_v (daN)	M_v (daN.m)
Support HEA 260	8.00	-	562	-	-	-	239	956
Fil de contact	5.50	2.80	31.4	88	29.5	174	26	153
Câble porteur	6.75	2.80	20	56	29.5	211	22	159
Armement	6.13	1.40	60	84	-	-	-	-
Câble de retour traction× 2	6.75	-0.11	33	-4	0.1	0.7	37	265
Ancrage FC	6.00	-	1231	-	81.6	524	13	83
Ancrage CP	7.25	-	1225	-	81.6	626	11	85
Contrepoids × 2	4.00	-	480	-	-	-	30	132
Appareil tendeur × 2	6.25	-	80	-	-	-	60	399
Total	-		3755.4	220	222.4	1536.4	475	2497

Les sollicitations extrêmes sont les suivantes :

- **À l'ELU :** $\begin{cases} M_{sd} = 6116.64\ daN.m \\ N_{sd} = 5069.8\ daN \\ V_{sd} = 1012.74\ daN \end{cases}$

- **À l'ELS :** $\begin{cases} M = 4253.4\ daN.m \\ N = 3755.4\ daN \\ V = 697.4\ daN \end{cases}$

V.6.3.2. Vérification des déplacements

Tableau V.22. Flèches due aux charges permanentes et aux charges de vent

	Support HEA 260	FC	CP	Armement	CRT × 2	Ancrage FC	Ancrage CP	Contrepoids × 2	Appareil tendeur × 2
δ_H (cm)	-	0.26	0.27	0.12	0.00	0.45	0.59	-	-
δ_h (cm)	0.358	0.08	0.09	-	0.15	0.05	0.05	0.06	0.22

- **Vérification de la flèche en tête de support due aux charges permanentes**

$\delta_H^{tot} = \sum \delta_H = 1.69\ cm < \delta_{adm} = 10.5\ cm$ → **La condition est vérifiée.**

- **Vérification de la flèche au niveau du fil de contact due aux charges de vent**

$\delta_h^{tot} = \sum \delta_h = 1.21\ cm < \delta_{adm} = 5.5\ cm$ → **La condition est vérifiée.**

- **Contre flèche**

Nous avons : $1.5 < \delta_H^{tot} = 1.69\ cm < 4.5$ → $\boldsymbol{C_f = 3cm}$.

V.6.3.3. Vérification de la résistance du support

La section **HEA 260** est de classe **I** avec les caractéristiques suivantes :

$$\boldsymbol{HEA\ 260}: \begin{cases} b = 260mm \\ t_w = 7.5mm \\ t_f = 12.5mm \\ d = 177mm \\ r = 24mm \\ \varepsilon = \sqrt{\dfrac{275}{f_y}} = 0.92 \end{cases}$$

N.B : Les étapes de vérification pour les supports précédents ont également été utilisées pour le support d'ancrage.

Tableau V.23. Paramètres de vérification de flexion simple (support d'ancrage)

Paramètre	$w_{ply}\ (cm^3)$	γ_{M0}	A (cm²)	A_w (cm²)	n	α
Valeur	919.8	1.1	86.82	21.82	0.023	0.25

Alors, nous avons : $\begin{cases} M_{sd} = 6116.64\ daN.m \\ M_{N,Rd} = 25676\ daN.m \end{cases}$ → $M_{sd} < M_{N,Rd}$ **la condition est vérifiée**.

V.6.3.4. Vérification de la résistance du support vis-à-vis du flambement

Tableau V.24. Paramètres de vérification de flambement (support d'ancrage)

Paramètre	β_A	γ_{M1}	λ	$\bar{\lambda}$	χ_{min}
Valeur	1	1.1	$\begin{cases} \text{Plan (y} - \text{y)} : \lambda_y = 145.8 \\ \text{Plan (z} - \text{z)} : \lambda_z = 75.38 \end{cases}$	$\bar{\lambda} = max\begin{cases} \overline{\lambda_y} = 1.68 \\ \overline{\lambda_z} = 0.87 \end{cases} = 1.68$	0.26

Alors, nous avons : $\begin{cases} N_{sd} = 5069.8\ daN \\ N_{b,Rd} = 56433\ daN \end{cases} \rightarrow N_{sd} < N_{b,Rd}$ **la condition est vérifiée.**

V.6.3.5. Vérification de la résistance du support au déversement

Tableau V.25. Paramètres de vérification de déversement (support d'ancrage)

Paramètre	β_w	γ_{M1}	Moment d'inertie I	C_1	Moment critique M_{cr} (N.cm)	$\overline{\lambda_{LT}}$	$\emptyset_{LT}$	χ_{LT}
Valeur	1	1.1	$\begin{cases} I_t = 52.37cm^4 \\ I_w = 516.4cm^6 \\ I_z = 3668cm^4 \end{cases}$	1.132	29984740.5	0.92	1	0.72

Alors, nous avons : $\begin{cases} M_{sd} = 6116.64\ daN.m \\ M_{b,Rd} = 16556\ daN.m \end{cases} \rightarrow M_{sd} < M_{b,Rd}$ **la condition est vérifiée**.

V.6.3.6. Vérification de la résistance du support au voilement par cisaillement

Il faut vérifier la condition suivante :

$$\frac{d}{t_w} \leq 69\varepsilon \rightarrow \frac{177}{7.5} = 23.6 < 69 \times 0.92 = 63.48$$

⟹ Donc, il n'y a pas lieu de vérifier le voilement par cisaillement avec cette section.

V.6.3.7. Taux de travail du support

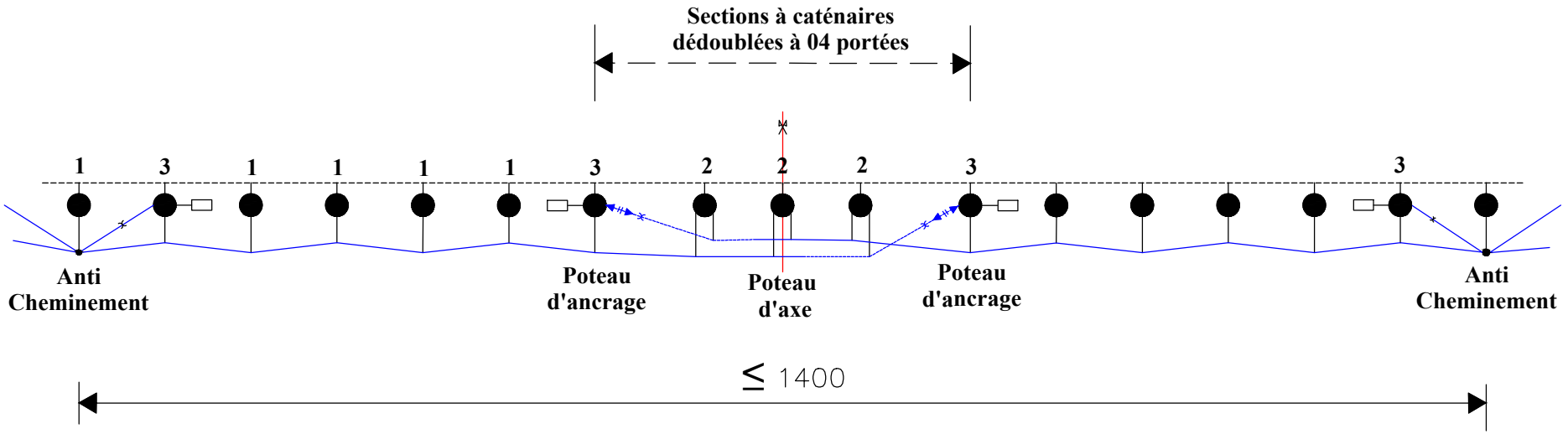
Le support d'ancrage avec la section HEA 260 a un taux de travail égal à **41%**.

- Après ces vérifications, nous avons conclu que le profilé **HEA 260**, convient comme support d'ancrage. (Cf. feuille de calcul Excel en ANNEXE C).

V.7. PLAN D'AFFECTATION DES SUPPORTS INDÉPENDANTS

Après avoir terminé le dimensionnement des supports indépendants, il faut présenter le type de chacun dans un plan explicatif qui devrait être une référence pour le piquetage final.

Plan d'affectation des supports sur un canton



LEGENDE:

- Ancrage
- Appareil tendeur
- Isolateur
- Poteau d'ancrage
- Poteau avec 2 consoles
- Poteau avec 1console
- Caténaire
- Câble de protection aérien

Type de poteau	N°
HEA 240	1
HEB 240	2
HEA 260	3

Thème: Etude d'une infrastructure ferroviaire pour l'installation d'une caténaire 25KV, 50Hz; Projet d'électrification de la Banlieue d'Alger.	**CHAPITRE IV:** Dimensionnement des supports de la caténaire	**Titre du plan:** Affectation des supports sur un canton	**Echelle:** 1/1000

ENSTP
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Build and Ground works engineering

V.8. DIMENSIONNEMENT ET ÉTUDE D'UN PORTIQUE RIGIDE

Les portiques sont utilisés là où de multiples voies sont installées, où l'espace entrevoie ne permet pas de mettre en place des suspensions sur poteaux indépendants, une telle situation que l'on retrouve généralement dans les gares et les endroits où la ligne est à trois voies ou plus comme le cas de la gare de "Rouiba", la caténaire doit être soutenue par une suspension fixée à des portiques fabriqués de poutres (charpente métallique). Cette configuration permet de traiter efficacement et indépendamment l'électrification de chacune des voies.

Il existe deux types de portique :

- **Portique rigide**

Il est constitué d'une poutre transversale à deux poteaux rigides implantés de part et d'autre des voies, supporte une chaise d'anti-balançant ainsi que les consoles. La place exigée pour l'installation des poteaux est petite.

Les nœuds du portique sont rigides et le système est hyperstatique.

- **Portique souple**

Il a les mêmes composants qu'un portique rigide mais il exige en général de grandes surfaces de poteaux. Les nœuds du portique souple sont articulés et le système est isostatique.

- Les portiques du présent projet seront rigides constitués de poutre en treillis en acier galvanisé. Les dimensions de la poutre varient en fonction des charges et de la portée du portique.
- Les dimensions des portiques rigides doivent être calculés en tenant compte du RPA et par calcul dynamique.

V.8.1. Évaluation des charges

Nous allons étudier le portique au niveau de la gare de "Rouiba", possédant les caractéristiques suivantes :

- Ouverture : $22m$;
- Hauteur des poteaux : $10m$;
- Portées encadrantes : $a_1 = 55m \; et \; a_2 = 45m$ pour les 04 voies ;
- Deux chaises à armement simple : $H_c < 3.23 \; m$.

V.8.1.1. Charges permanentes

V.8.1.1.1. Poids du poteau

Pour le poteau, le profilé supposé est un **HEM 300**, après nous allons vérifier si ce profilé est le meilleur pour notre support vis-à-vis la stabilité et la résistance.

$$W_s = 2451.4 \; daN$$

V.8.1.1.2. Poids de la poutre

Le poids de la poutre autoporteuse de portique rigide est en fonction de longueurs prédéfinies dépendant de l'ouverture du portique.

- Section de la poutre : HEB 500 avec un poids linéaire égal à **187.3 daN/m**.

V.8.1.1.3. Poids de la chaise

Une chaise de hauteur $H_c < 3.23\ m$, son poids unitaire est égal à **105 daN**.

V.8.1.1.4. Poids des câbles et armement

Le poids linéaire des câbles ainsi que le poids de l'armement ont été déjà mentionné dans les calculs des supports indépendants.

Pour simplifier les calculs et la modélisation du portique, nous allons considérer que les efforts dus au contact et au porteur s'appliquent aux points A, B, C, D (comme indique la figure V.7). Aux mêmes points sont appliqués les efforts dus aux chaises et consoles. Les efforts dus à deux ancrages de câbles de retour sont appliqués aux points H1 et H2.

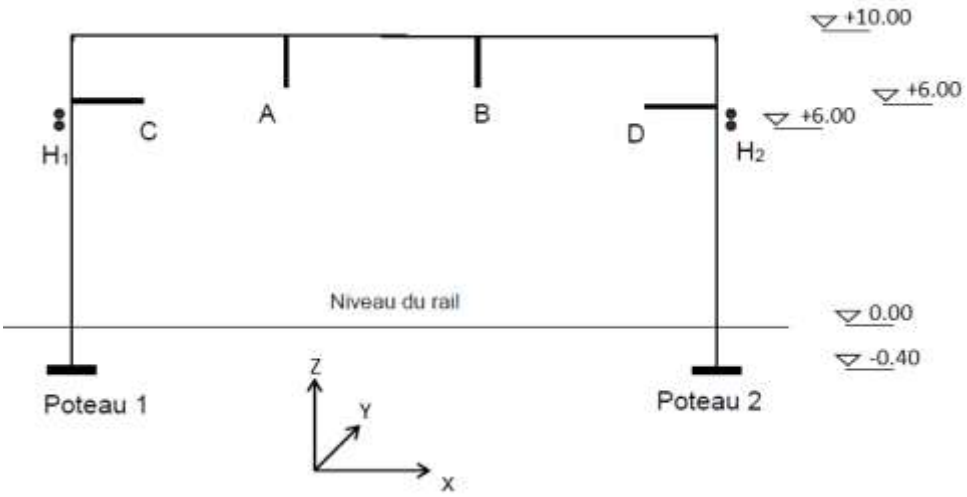


Figure V.7. Schéma du portique simplifié

V.8.1.1.5. Tensions radiales

Avec les mêmes formules utilisées pour les calculs des supports indépendants, les désaxements sont les suivants :

Voies principales $\rightarrow \begin{cases} V1:\ b = +0.2\ m \\ V2:\ b = -0.2\ m \end{cases}$; Voies de services $\rightarrow \begin{cases} V3:\ b = -0.2\ m \\ V4:\ b = +0.1\ m \end{cases}$

V.8.1.2. Charges climatiques

Dans le cas d'un portique, les deux directions du vent sont prises en compte (perpendiculaires et parallèles) à cause de l'existence de la poutre et les chaises.

Les résultats seront présentés dans le tableau V.26.

V.8.1.3. Charges sismiques

La méthode choisie pour le calcul des charges sismiques est la méthode statique équivalente car la structure ne dépasse pas 10 mètres de hauteur ; Cette méthode consiste à remplacer les forces réelles dynamiques qui se développent dans la construction par un système de forces statiques fictives dont les effets sont considérés équivalents à ceux de l'action sismique.

La force sismique totale **V**, appliquée à la base de la structure, doit être calculée successivement dans deux directions horizontales orthogonales selon la formule suivante :

$$V = \frac{A \times D \times Q}{R} \times W$$

Avec :

- $A = 0.25$: Coefficient d'accélération de zone (Cf. Tableau C.2 en ANNEXE C) ;
- D : Facteur d'amplification dynamique moyen, fonction de la catégorie de site, du facteur de correction d'amortissement η, de la période fondamentale de la structure T et la période caractéristique T_2 ;
  - $T = C_T \times {h_N}^{3/4}$: Période fondamentale de la structure ;
    - $C_T = 0.085$: Coefficient fonction du type de structure (Cf. Tableau C.3 en ANNEXE C) ;
    - $h_N = 10m$: hauteur mesurée à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau (N).

$$\rightarrow \quad T = 0.48\ s$$

  - $T_2 = 0.5\ s$: Période caractéristique pour la catégorie de site S3 (Cf. Tableau C.4 en ANNEXE C) ;

$$0 < T < T_2 \quad \rightarrow \quad D = 2.5\eta$$

  - $\eta = \sqrt{7/(2+\xi)}$: Facteur de correction d'amortissement ;
    - $\xi = 4\%$: Pourcentage d'amortissement critique (Cf. Tableau C.5 en ANNEXE C) ;

$$\eta = 1.08 \quad \rightarrow \ D = 2.7$$

- $Q = 1$: Facteur de qualité ;
- $R = 2$: Coefficient de comportement global (Cf. Tableau C.6 en ANNEXE C) ;
- W : Poids de la structure.

Donc : $$\boldsymbol{V = 0.34 \times W}$$

V.8.1.3.1. Distribution de la résultante des forces sismiques selon la hauteur

La résultante des forces sismiques à la base **V** doit être distribuée sur la hauteur de la structure selon les formules suivantes :

$$V = F_t + \sum F_i$$

- $F_t = 0.07 \times T \times V$: Force concentrée au sommet de la structure, est prise égale à 0 car la valeur de $T \leq 0.7s$;
- $F_i = \frac{W_i \times h_i}{\sum_{j=1}^{n} W_j \times h_j} \times V$: Force distribuée sur la hauteur de la structure.

Les efforts sismiques F_i s'expriment dans les deux directions principales x et z du portique et sont répartis sur la hauteur de celui-ci comme suit :

- $F_{1x} = F_{1z}$: L'effort sismique induit par la masse de l'équipement du poteau ;
- $F_{2x} = F_{2z}$: L'effort sismique induit par la masse des câbles de retour courant ;
- $F_{3x} = F_{3z}$: L'effort sismique induit par la masse de la poutre et les équipements repris par la poutre ;

- $F_{4x} = F_{4z}$: L'effort sismique induit par la masse du poteau.

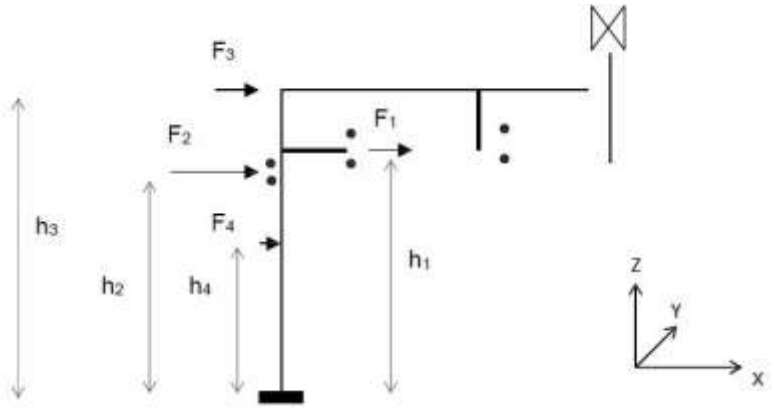


Figure V.8. Distribution de la charge sismique

Tableau V.26. Récapitulatif des charges appliquées sur le portique

Charge	Poids G (daN)	Tension radiale T_{rad} (daN)	Vent $V_{\perp}$ (daN)	Vent $V_{//}$ (daN)	Effort sismique $E_{\perp}$ (daN)	Effort sismique $E_{//}$ (daN)
Direction de l'application	Z	X	X	Y	X	Y
Poteau	2451.4	-	360	230	464.83	464.83
Poutre	4120.6	-	-	770	1953.4	1953.4
A	243	39	238	189	-	-
B	243	39	238	189	-	-
C	138	19.4	72	30	39.3	39.3
D	138	19.4	72	30	39.3	39.3
H1	99	4	113	-	28.2	28.2
H2	99	4	113	-	28.2	28.2

V.8.2. Modélisation

La modélisation du portique a été faite à l'aide de logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, en suivant les étapes suivantes :

- Le portique est défini par des éléments barres ;
- La section des poteaux a été choisie au préalable (HEM 300) et (HEB 500 pour la poutre) ;
- Les charges sont définies dans le tableau V.26 ;

Le but est de trouver les sollicitations extrêmes au niveau de l'encastrement des poteaux, pour vérifier si la section choisie supporte ces sollicitations.

V.8.3. Combinaisons de charges

Les combinaisons prises en compte sont :

- À l'ELU : $\begin{cases} (1):\ 1.35G + 1.35R + 1.5Q_x \\ (2):\ 1.35G + 1.35R + 1.5Q_y \\ (3):\ 1.00G + 1.00R + 1.2E_x \\ (4):\ 1.00G + 1.00R + 1.2E_y \end{cases}$; À l'ELS : $\begin{cases} (5):\ G + R + Q_x \\ (6):\ G + R + Q_y \\ (7):\ G + R + E_x \\ (8):\ G + R + E_y \end{cases}$

V.8.4. Résultats

Le logiciel de calcul utilise la méthode des éléments finis et la théorie de l'élasticité pour la détermination des éléments de réduction (M, N et T) et les contraintes maximales.

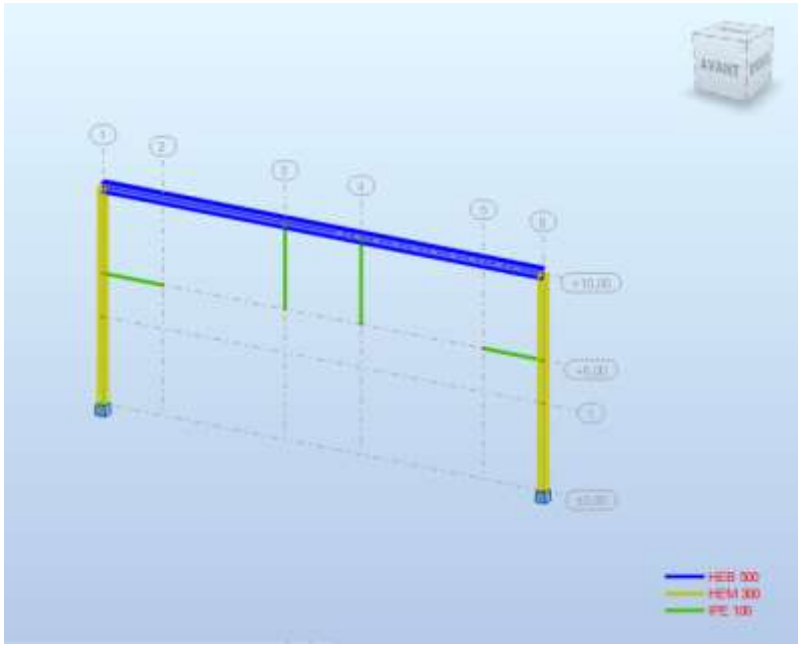


Figure V.9. Modèle de calcul du portique 22m d'ouverture

Après avoir procéder au calcul de la structure à l'E.L.U et à l'E.L.S, les résultats à prendre en compte sont les efforts maximaux au niveau de l'encastrement des poteaux.

- Il est à noter que les valeurs extrêmes ont été obtenues avec les combinaisons sismiques N° 4 à l'ELU et N° 8 à l'ELS.

Les résultats sont résumés dans le tableau V.27 :

Tableau V.27. Efforts internes maximaux à l'ELU (portique 22m)

	Contrainte (MPa)	F_x (daN)	F_z (daN)	M_y $(daN.m)$	M_z $(daN.m)$
Max	121.05	6841.49	3987.28	-19197.51	-26157.98
Poteau N°	1	2	2	2	1 et 2
Combinaison associée N°	3	1	3	3	4

Tableau V.28. Efforts internes maximaux à l'ELS (portique 22m)

	Contrainte (MPa)	F_x (daN)	F_z (daN)	M_y $(daN.m)$	M_z $(daN.m)$
Max	174.13	5767.80	3490.12	-16544.07	-21798.32
Poteau N°	1 et 2	2	2	2	1 et 2
Combinaison associée N°	8	7	7	7	8

V.8.5. Vérification de la résistance des poteaux

Les étapes et les formules de la vérification des poteaux ont également été utilisées pour la vérification des supports indépendants.

- Pour ce portique, les vérifications sont faites à l'aide du logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALSIS.
- Avec les combinaisons sismiques qui ont donné les sollicitations extrêmes, le logiciel a fourni les résultats suivants :

Résultats | Messages

Pièce	Profil	Matériau	Lay	Laz	Ratio	Cas
1 Poteau_1	OK HEM 300	ACIER	71.55	124.98	0.43	G + R + 1.2Ey
2 Poteau_2	OK HEM 300	ACIER	71.55	124.98	0.43	G + R + 1.2Ey

Figure V.10. Tableau de vérification de la résistance des poteaux (ROBOT S.A)

Ce tableau montre que le taux de travail (ratio) "$\tau = \sigma_{ser}/\sigma_{adm}$", pour les deux poteaux, est inférieur strictement à 1, cela signifie que la section choisie est largement suffisante pour supporter les charges du portique.

La figure V.11, montre que la section HEM 300 est stable vis-à-vis du flambement, du déversement et du voilement.

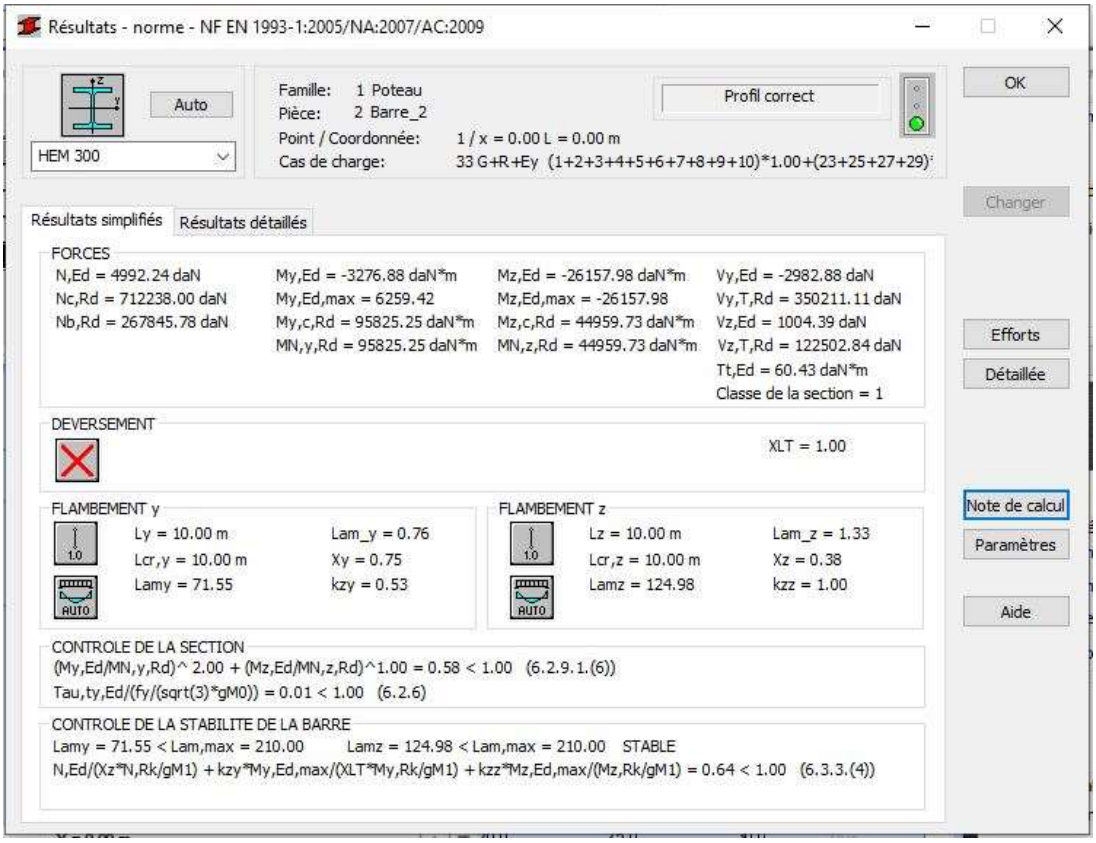


Figure V.11. Résultat des vérifications de la section vis-à-vis des instabilités (ROBOT S.A)

Les détails sur la modélisation et la note de calcul sont présentés en ANNEXE C.

- Pour conclure, les poteaux avec une section HEM 300 sont correctement dimensionnés pour un portique de 22 m d'ouverture.

V.9. CONCLUSION

À travers ce chapitre, nous avons pu suivre étape par étape le dimensionnement de chaque type de support présent dans le tronçon du présent projet, y compris la modélisation et l'étude d'un portique. Dans le chapitre suivant, nous nous consacrerons au dimensionnement des fondations.

CHAPITRE VI

"Dimensionnement des fondations"

CHAPITRE VI : DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS

VI.1. INTRODUCTION

Les fondations doivent transmettre au sol, les charges verticales, les charges sismiques horizontales. Cela exige d'une part une liaison efficace des fondations avec les supports de la caténaire, et d'autre part, un bon ancrage au niveau du sol.

Au cours de ce chapitre, nous procéderons tout d'abord aux vérifications des pieds de supports encastrés, ensuite au dimensionnement des fondations pour chaque type de support de la caténaire.

VI.2. HYPOTHÈSES DE CALCUL

VI.2.1. Hypothèses géotechniques

Tableau VI.1. Hypothèses géotechniques

Élément	N° de Sondage	Paramètre	Attribut
Sol de fondation	2	$\gamma_d^{max}(\mathrm{t}/m^3)$	2.16
	4	$\gamma_d^{min}(\mathrm{t}/m^3)$	1.40
Contrainte admissible du sol	-	$\sigma_{sol}\ (MPa)$	0.14

Le cas le plus défavorable, pour le dimensionnement des fondations, est obtenu avec la plus petite valeur de densité du sol $\gamma_d^{min} = 1.40\ t/m^3$.

VI.2.2. Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques du béton utilisé pour les fondations sont présentes dans le tableau VI.2 :

Tableau VI.2. Caractéristiques du béton utilisé pour les fondations

Matériau	Désignation	Attribut	
Béton	Résistance caractéristique à la compression	f_{c28}	25 MPa
	Résistance caractéristique à la traction	$f_{t28} = 0.6 + 0.06 f_{c28}$	2.1MPa
	Contrainte admissible	$\bar{\sigma}_{bc} = 0.6 f_{c28}$	15 MPa
	Coefficient de sécurité	γ_b	1.5
	Contrainte maximum du béton	$f_{bu} = \dfrac{0.85 \times f_{c28}}{\gamma_b \times \theta}$	14.17 MPa

- Le béton est dosé à 350 kg/m^3 de ciment CPA 325.

VI.3. ASSEMBLAGE DES PIEDS DE SUPPORTS ENCASTRÉS

Les supports sont liés avec la fondation par l'intermédiaire d'une platine et des tiges d'ancrage. Ce sont des éléments de continuité, appelés aussi les dispositifs de liaison.

VI.3.1. Dimensionnement de la platine

La platine ou la plaque d'assise assure la réduction de la pression dans le béton, elle est soudée au poteau à travers les cordons de soudures.

Parmi les méthodes de détermination des dimensions (a×b) de la platine, il y a celle utilisant les cordons de soudures. Ensuite, l'épaisseur "t_p" sera déterminée en fonction des contraintes.

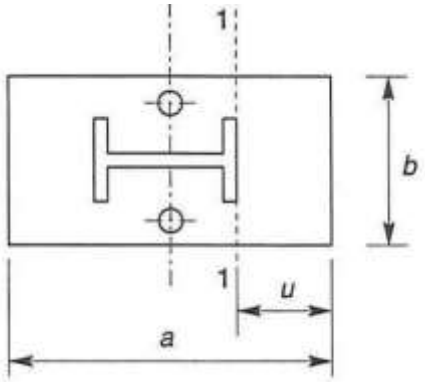


Figure VI.1. Une platine type avec 02 tiges d'ancrage

VI.3.1.1. Choix des cordons de soudures

Nous allons prendre la section la plus grande parmi les sections des supports déterminés en Chapitre V, qui est la HEM 300.

Caractéristiques de la section : $\begin{cases} h = 340mm \\ b = 310mm \\ t_f = 39mm \\ t_w = 21mm \end{cases}$

a. Cordon semelle "a_s"

$a_s = 0.7t_f = 0.7 \times 39 = 27.3mm \rightarrow$ On prend $\boldsymbol{a_s = 30mm}$

b. Cordon d'âme "a_d"

$a_d = 0.7t_w = 0.7 \times 21 = 14.7mm \rightarrow$ On prend $\boldsymbol{a_d = 15mm}$

La largeur minimale de la platine "$\boldsymbol{h_p^{min}}$" est donnée par la formule suivante :

$h_p^{min} = 2 \times a_s + h = 2 \times 30 + 340 = 400mm \rightarrow$ On prend $\boldsymbol{b = 500mm}$

- On choisit le cas d'une platine carré (500×500).

VI.3.1.2. Épaisseur de la platine

L'épaisseur de la platine est déterminée par l'inégalité suivante :

$$t_p \geq u \times \sqrt{\frac{3\sigma}{f_y}}$$

Avec :

- u : Distance horizontale entre le bord de la platine et la semelle, prise égale à 100mm ;
- $\sigma = \frac{N}{a \times b}$: Contrainte de compression ;
  - $N = 3987.28$ daN : Effort normal maximal à l'ELU donné par la combinaison G+R+1.2E_x ;

$$\sigma = \frac{3987.28}{500^2} = 0.016\ daN/mm^2$$

- $f_y = 275\ N/mm^2$: Résistance limite d'élasticité de l'acier ;

$t_p \geq 100 \times \sqrt{\frac{3\times0.016}{27.5}} \rightarrow t_p \geq 4.17\text{mm}$; On prend $\boldsymbol{t_p = 25mm}$

- Donc, la platine choisie pour les supports possède les dimensions (500×500×25).

VI.3.1.3. Vérification de la résistance de la platine

La plaque d'assise risque de se plier, donc selon l'Eurocode 3, il faut vérifier :

$$\sigma_{tot} < \overline{\sigma_{bc}}$$

Avec :

- $\sigma_{tot} = \frac{N_{sd}}{a\times b} + \frac{M_{sd}}{(b\times h^3)/12} \times \frac{l_z}{2}$: Contrainte totale sous l'effort de compression et le moment fléchissant.
- $\overline{\sigma_{bc}} = 15\ MPa$: Contrainte admissible du béton.

$$\sigma_{tot} = \frac{39.8728}{0.5^2} + \frac{191.9751}{0.5^4/12} \times \frac{0.5}{2} \rightarrow \ \sigma_{tot} = 0.9\ MPa\ < \overline{\sigma_{bc}} = 15\ MPa$$

→ La condition est vérifiée.

VI.3.2. Dimensionnement des tiges d'encrages

Pour trouver le diamètre d'une tige d'ancrage, il faut vérifier l'inégalité suivante (selon l'Eurocode 3) :

$$\frac{N_t}{n} \leq \frac{\pi \times \emptyset^2}{4} \times f_y \ \rightarrow \ \emptyset \geq \sqrt{\frac{4 \times N_t}{n \times \pi \times f_y}}$$

Avec :

- N_t : Effort de soulèvement au vent (sous G+Q) ;
- $n = 4$: Nombre de tiges ;
- $\emptyset$: Diamètre de la tige (à déterminer) ;

Tableau VI.3. Détermination du diamètre des tiges d'ancrage pour chaque type de support

Support	HEA 240	HEA 260	HEB 240	HEM 300
$\boldsymbol{N_t(daN)}$	1732.29	5782.29	1923.3	7568.4
$\emptyset$ (mm) à prendre	30	39	30	39

VI.3.2.1. Vérification des tiges d'ancrage

Il faut vérifier que : $N_a > N_t/n$

Avec :

- $N_a = 0.1(1 + \frac{7\times g_c}{1000}) \times \frac{\emptyset}{\left(1+\frac{\emptyset}{d_1}\right)^2} \times (l_1 + 6.4r + 3.5l_2)$:
  Effort admissible par scellement de la tige ;
  - $l_1 = 20\emptyset$;
  - $l_2 = 2\emptyset$;
  - $r = 3\emptyset$;
- $g_c = 350\ kg/m^3$: Dosage en ciment ;

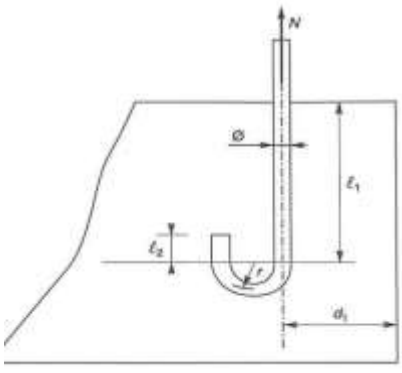


Figure VI.2. Schéma d'une tige

- $d_1 = 5cm$.

Tableau VI.4. Vérification des tiges d'ancrage pour chaque type de support

Support	HEA 240	HEA 260	HEB 240	HEM 300
$N_t/4$ (daN)	433.07	1445.57	480.82	1892.1
$\emptyset$ (mm)	30	39	30	39
N_a (daN)	5603.6	7651.6	5603.6	7651.6
Vérification $N_a > N_t$	vérifiée	vérifiée	vérifiée	vérifiée

VI.4. CHOIX DE TYPE DE FONDATION

Pour les supports de la caténaire, la fondation choisie est une fondation cylindrique de diamètre "d" et profondeur "h". Ce sont des fondations semi-profondes. Ce choix dépend de :

- La capacité portante du sol ;
- Les charges apportées par le support.

Il existe d'autres types, comme la fondation parallélépipède pour un support sur quai, la fondation sur trottoir et la fondation champignon.

Le code RP1/UIC pour le calcul des fondations, propose une gamme de fondations cylindriques pour chaque profilé métallique. (Cf. Tableau D.1 en ANNEXE D)

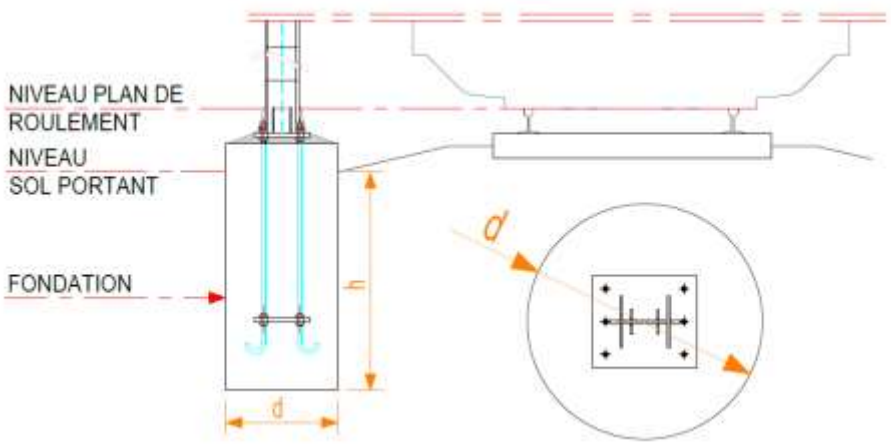


Figure VI.3. Coupe transversale de la fondation cylindrique

VI.5. MÉTHODE DE CALCUL DES FONDATIONS

Le dimensionnement des fondations cylindriques est calculé par la méthode UIC / ORE basée sur la détermination du moment limite du terrain.

Les fondations de la caténaire sont soumises aux règles du règlement parasismique algérien RPA 99.

Deux types de fondations sont définis pour ce projet :

- Fondation des supports indépendants, caractérisées par leur profondeur, ont été définies en fonction du moment maximum en tête ;
- Fondation d'ancrage.

VI.5.1. Fondations des supports indépendants

VI.5.1.1. Détermination du moment maximum en tête de fondation

Le moment maximum en tête de fondation (M) est obtenu en prenant un coefficient de sécurité 3 par rapport au moment de ruine du terrain $M = \frac{M_{RT}}{3}$, il faut vérifier que :

$$M_{sollicitant} < M$$

Avec :

- $M_{sollicitant}$: Moment sollicitant en pieds de support ;
- $M_{RT} = 27.45 \times M_B^{2/3}$: Moment de ruine de terrain ;
- $M_B = (1 - \varepsilon_p) \times M_r$: Moment limite au niveau du sol ;
- $1 - \varepsilon_p = 3.44\left[1 + (\frac{h_{mt}}{h_{enc}})^3\right] - 2.44 \times \sqrt{\left[1 + (\frac{h_{mt}}{h_{enc}})^2\right]^3}$: Facteur correctif tenant compte du terrain mort ;
  - h_{mt}: Hauteur de terrain meuble sans pression exercée (mort terrain) ;
  - $h_{enc} = h - h_{hs}$: Hauteur d'ancrage ;
- $M_r = (0.32 \times d \times N) + (0.8K_2 \times \Delta \times d \times h_{enc}^3)$: Moment de renversement ;
  - d : Diamètre de la fondation ;
  - N : Charge verticale totale (charge verticale en tête de fondation+ poids de la fondation) ;
  - $K_2 = 1.45\left[2.8 - \frac{96.5}{68.5+3.375\times(\frac{N}{10\Delta\times(0.8d)^3})^3}\right]$: Coefficient ;
  - Δ : Masse volumique du sol.

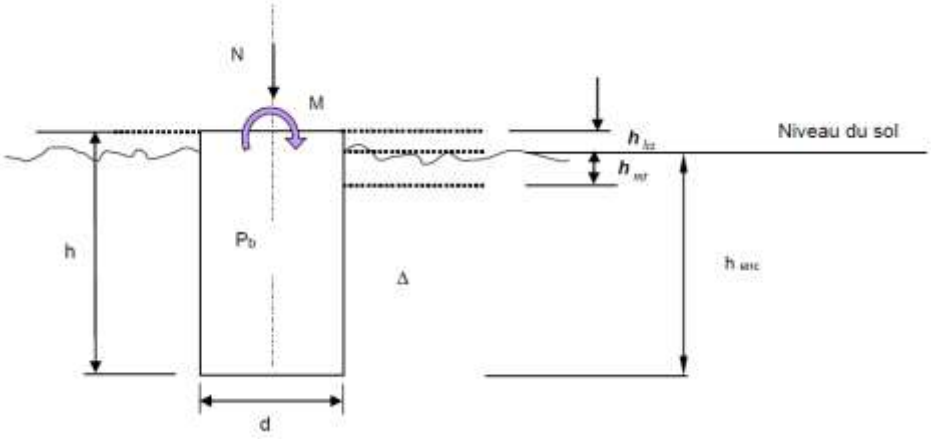


Figure VI.4. Dimensions d'une fondation cylindrique

Les données constantes :

- $h_{hs} = 0.1m$: Hauteur hors sol de la fondation ;
- $h_{mt} = 0.3m$: Hauteur de terrain mort ;
- $\rho_b = 2500\ kg/m^3$: Masse volumique du béton ;
- $\Delta = 1400\ kg/m^3$: Masse volumique du sol.

VI.5.1.2. Vérification de la pression latérale

On vérifie que les pressions latérales P_1 et P_2 , exercées par la fondation sur le sol, sont inférieures à la contrainte admissible minimum du sol.

$$P_1 = \frac{6 \times V(h_{enc} - \frac{h_1}{3})}{0.8 \times d \times h_1^2} \quad et \quad P_2 = \frac{6 \times V(h_{enc} - \frac{2h_1}{3})}{0.8 \times d \times h_1^2}$$

Avec :

- V : Effort tranchant en tête de la fondation ;
- $h_1 = h - h_{hs} - h_{mt}$: Hauteur active de la fondation.

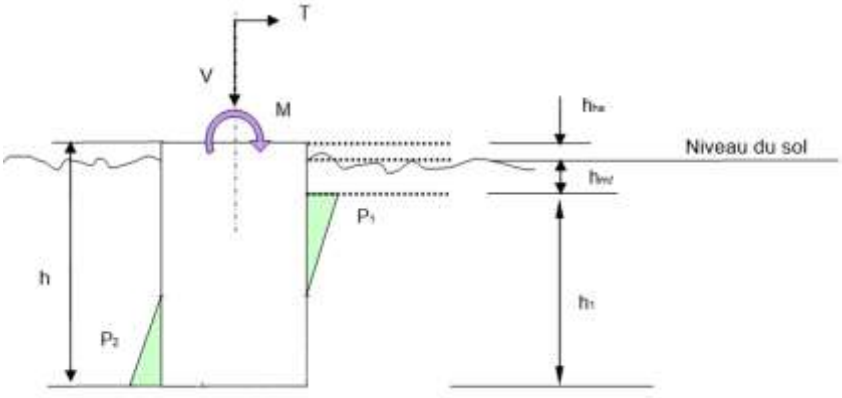


Figure VI.5. Pressions latérales P1 et P2

a. Support HEA 240

- Caractéristiques de la fondation : $\begin{cases} d = 0.8m \\ h = 2.5m \end{cases}$;
- $M_{sollicitant} = 3030.95\ daN.m$ (Cf. Chapitre V, §6.1.3) ;
- $N = N_{support} + P_{fondation} = 779.4 + \left(2.5 \times \frac{\pi \times 0.8^2}{4}\right) \times 2500 = 3919.4\ daN$;
- $V = 484.1\ daN$.

A.N: $\begin{cases} M_{RT} = 15182.0.8\ daN.m \\ M = 5060.69\ daN.m \end{cases} \rightarrow M_{sollicitant} < M \quad La\ condition\ est\ vérifiée$

$\begin{cases} P_1 = 0.024\ MPa < \sigma_{sol} = 0.14\ MPa \\ P_2 = 0.015\ MPa < \sigma_{sol} = 0.14\ MPa \end{cases} \rightarrow \ La\ condition\ est\ vérifiée.$

b. Support HEB 240

- Caractéristiques de la fondation : $\begin{cases} d = 0.8m \\ h = 2.8m \end{cases}$;
- $M_{sollicitant} = 3842.4\ daN.m$ (Cf. Chapitre V, §6.1.3) ;
- $N = N_{support} + P_{fondation} = 982 + \left(2.5 \times \frac{\pi \times 0.8^2}{4}\right) \times 2500 = 4498.8\ daN$;
- $V = 581.4\ daN$.

A.N: $\begin{cases} M_{RT} = 20698.55\ daN.m \\ M = 6899.52\ daN.m \end{cases} \rightarrow M_{sollicitant} < M \quad La\ condition\ est\ vérifiée$

$\begin{cases} P_1 = 0.024\ MPa < \sigma_{sol} = 0.14\ MPa \\ P_2 = 0.014\ MPa < \sigma_{sol} = 0.14\ MPa \end{cases} \rightarrow \ La\ condition\ est\ vérifiée.$

c. Support HEA 260

- Caractéristiques de la fondation : $\begin{cases} d = 0.8m \\ h = 2.7m \end{cases}$;
- $M_{sollicitant} = 4253.4\ daN.m$ (Cf. Chapitre V, §6.3.1.1) ;

- $N = N_{support} + P_{fondation} = 3755.4 + \left(2.7 \times \frac{\pi \times 0.8^2}{4}\right) \times 2500 = 7146.6\ daN$;
- $V = 697.4\ daN$.

A.N: $\begin{cases} M_{RT} = 21282.57\ daN.m \\ M = 7094.19\ daN.m \end{cases} \rightarrow M_{sollicitant} < M$ *La condition est vérifiée*

$\begin{cases} P_1 = 0.03\ MPa < \sigma_{sol} = 0.14\ MPa \\ P_2 = 0.018\ MPa < \sigma_{sol} = 0.14\ MPa \end{cases} \rightarrow$ *La condition est vérifiée*

d. Support HEM 300

- Caractéristiques de la fondation : $\begin{cases} d = 1m \\ h = 4m \end{cases}$;
- $M_{sollicitant} = 16544.07\ daN.m$ (Cf. Chapitre V, §6.1.3) ;
- $N = N_{support} + P_{fondation} = 3490.12 + \left(2.5 \times \frac{\pi \times 0.8^2}{4}\right) \times 2500 = 11340.12\ daN$;
- $V = 5767.80\ daN$.

A.N: $\begin{cases} M_{RT} = 60824.78\ daN.m \\ M = 20274.93\ daN.m \end{cases} \rightarrow M_{sollicitant} < M$ *La condition est vérifiée*

$\begin{cases} P_1 = 0.11\ MPa < \sigma_{sol} = 0.14\ MPa \\ P_2 = 0.06\ MPa < \sigma_{sol} = 0.14\ MPa \end{cases} \rightarrow$ *La condition est vérifiée.*

Tableau VI.5. Récapitulatif des dimensions de fondation pour chaque type de support

Type de support	Diamètre (m)	Hauteur (m)
HEA 240	0.8	2.5
HEB 240	0.8	2.8
HEA 260	0.8	2.7
HEM 300	1.0	4

VI.5.1.3. Ferraillage

Les fondations cylindriques sont sollicitées en flexion composée. La note de calcul est présentée en ANNEXE D.

Tableau VI.6. Armatures longitudinales et transversales des fondations cylindriques

	Armatures longitudinales (cm²)		Armatures transversales		
Section	A_s	Choix	$A_t(cm^2)$	Cadre	$S_t(cm)$
HEA 240	30.14	$8HA25 = 39.27$	1.6	$Cercle\ \emptyset 16$	20
HEB 240	50.3	$12HA25 = 58.9$	1.6	$Cercle\ \emptyset 16$	20
HEA 260	50.3	$12HA25 = 58.9$	1.6	$Cercle\ \emptyset 16$	20
HEM 300	78.5	$16HA25 = 78.54$	1.6	$Cercle\ \emptyset 16$	20

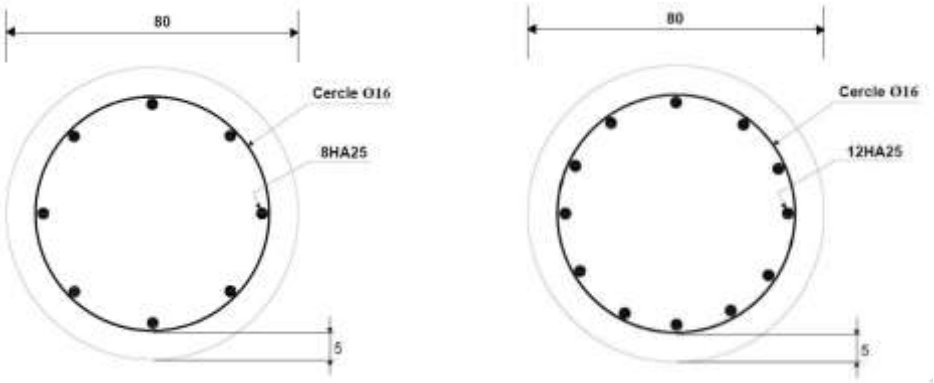


Figure VI.6. Schéma de ferraillage d'une fondation de Ø80cm avec 8 barres et 12barres

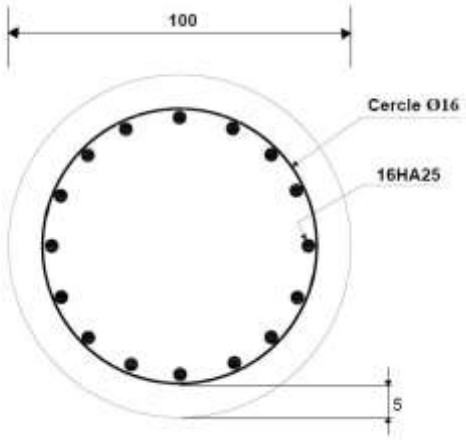


Figure VI.7. Schéma de ferraillage d'une fondation de Ø100cm avec 16 barres

VI.5.2. Fondation d'ancrage

VI.5.2.1. Détermination de la force d'arrachement

Pour une fondation d'ancrage la force d'arrachement (FA) doit satisfaire à la relation suivante :

$$F_A \geq F \times \tan \alpha$$

Avec :

- F : Tensions des conducteurs ancrés ;
- $\alpha = 45°$: Angle d'inclinaison du câble d'ancrage ;
- $F_A = \frac{\left[\frac{h_{enc}\times\pi}{3}\times(r^2+r\times\frac{d}{2}+\left(\frac{d}{2}\right)^2-\frac{d^2\times h_{enc}\times\pi}{4})\right]\times\Delta}{3} + (\frac{d^2\times h\times\pi}{4}) \times \rho_b$: Résistance admissible à l'arrachement ;
  - $r = \frac{d}{2} + h_{enc} \times \tan \beta$.

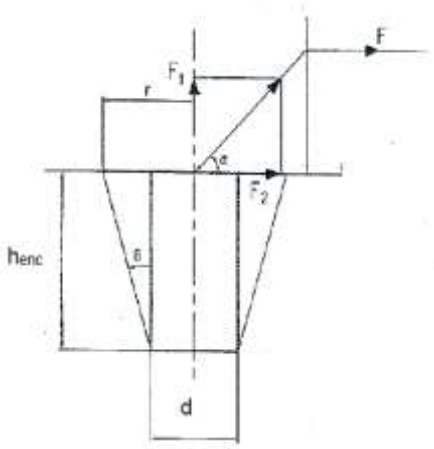


Figure VI.8. Fondation d'ancrage

VI.5.2.2. Vérification de la pression latérale

Comme pour les fondations des supports indépendants, on vérifie que les pressions latérales P_1 et P_2, exercées par la fondation sur le sol, sont inférieures à la contrainte admissible minimum du sol.

P_1 et P_2 sont calculées avec une résultante horizontale de la tension des conducteurs ancrés égale à la tension de ses derniers (F2 = F).

$$P_1 = \frac{6 \times F(h_{enc} - \frac{h_1}{3})}{0.8 \times d \times h_1^2} \quad et \quad P_2 = \frac{6 \times F(h_{enc} - \frac{2h_1}{3})}{0.8 \times d \times h_1^2}$$

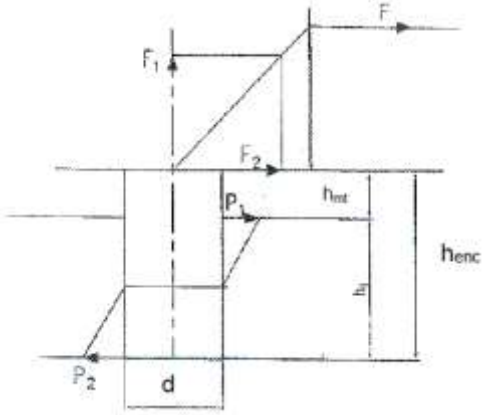


Figure VI.9. Pressions latérales pour une fondation d'ancrage

- **Fondation d'ancrage pour le support HEA 260**

Nous avons les données suivantes :

- $F = 2400\ daN$: Effort d'ancrage maximum (pour les 02 conducteurs) ;
- Caractéristiques de la fondation proposée : $\begin{cases} d = 0.8m \\ h = 2.8m \end{cases}$;

A.N :

$$\begin{cases} h_{enc} = 2.2m \\ h_1 = 1.9m \\ r = 0.87m \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_A = 4163\ daN\ > 2400\ daN \\ P_1 = 0.13\ MPa < 0.14\ MPa \\ P_2 = 0.10\ MPa < 0.14\ MPa \end{cases} \rightarrow Les\ conditions\ sont\ vérifiées.$$

- Pour un effort d'encrage de 2400 daN, on affecte une fondation cylindrique de 0.8m de diamètre et 2.8m de hauteur.

VI.5.2.3. Ferraillage

Pour le ferraillage de la fondation d'ancrage, nous avons :

a. Armatures longitudinales

$A_{s_{min}} = 30.2\ cm^2 \rightarrow Choix\ des\ barres: 8HA25 = 39.27\ cm^2.$

b. Armatures transversales

$A_t = 1.6\ cm^2 \rightarrow Choix:\ cercle\ de\ diamètre\ \emptyset 16\ et\ un\ espacement\ de\ S_t = 20cm.$

VI.6. CONCLUSION

Les fondations représentent la partie de l'ouvrage en contact avec le sol d'assise. Ces dernières doivent pouvoir lui transmettre tous les efforts de la superstructure sans dépassement des paramètres indiqués sur le rapport géotechnique en particulier la contrainte admissible.

À travers ce chapitre, nous avons pu vérifier les pieds des supports encastrés, mais aussi déterminer les dimensions des fondations pour chaque type de support. Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à l'impact qu'aura le projet sur l'environnement dans lequel il est implanté.

CHAPITRE VII

"Étude d'impact sur l'environnement"

CHAPITRE VII : ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

VII.1. INTRODUCTION

Quelle que soit leur nature, les ouvrages peuvent potentiellement avoir des impacts importants sur l'environnement à chacune des phases du projet. Ce chapitre aborde les répercussions du projet d'électrification de la banlieue d'Alger sur l'environnement naturel, humain et socio-économique, dans le but de le protéger et de permettre l'intégration de la voie électrifiée et toutes les activités qui en découlent dans les meilleures conditions possibles, sans porter atteinte à son environnement.

VII.2. CADRE JURIDIQUE

L'étude d'impact est réalisée conformément à la législation algérienne en vigueur, à savoir, le décret exécutif n°18-255 du 29 Moharram 1440 correspondant au 9 octobre 2018 modifiant et complétant le décret exécutif n°07-145 du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 9 mai 2007 déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et des notices d'impact sur l'environnement.

Selon l'article 3 du décret, le contenu de l'étude ou de la notice d'impact doit comprendre :

1. La présentation du promoteur du projet, son nom ou raison social, son expérience ainsi que la présentation du bureau d'études accompagnée d'une copie de son agrément délivré par le ministre chargé de l'environnement ;
2. L'analyse des alternatives et variantes éventuelles des différentes options du projet en expliquant et en fondant les choix retenus aux plans économique, technologique et environnemental ;
3. La délimitation de la zone d'étude et la description détaillée de l'état initial du site et de son environnement accompagnée d'un plan de situation et d'un plan de masse ;
4. La description détaillée des différentes phases du projet et l'estimation des catégories et des quantités de résidus, d'émissions et de nuisances susceptibles d'être générés ;
5. L'évaluation des impacts prévisibles directs et indirects, à court, moyen et long terme du projet sur l'environnement et des effets cumulatifs ;
6. La description des mesures envisagées par le promoteur pour supprimer, réduire et/ou compenser les conséquences dommageables des différentes phases du projet ;
7. Le plan de gestion de l'environnement détaillé avec son planning d'exécution ;
8. Les incidences financières allouées aux mesures préconisées et toute autre information, document ou étude soumis par les bureaux d'études pour fonder le contenu de l'étude d'impact ;
9. Un rapport descriptif du projet, établi par le bureau d'études et mis à la disposition du public durant la période de l'enquête publique.

VII.3. DESCRIPTION DU PROJET

- **Promoteur du projet :** Société Nationale des Transports Ferroviaires "SNTF" ;
- **Entreprise de réalisation :** Groupement ALBATIR "ALSTOM Algérie/ Transport, BATICIM et IFRARAIL" ;
- **Bureau d'étude :** ALSTOM ;

- **Contrôle et suivis :** DESSAU SOPRIN et DEC ;
- **Choix de la zone :** La réalisation du projet de l'électrification de la banlieue d'Alger sur une ligne ferroviaire existante a pour objectif de diminuer le temps de parcours ferroviaire dans la zone et d'améliorer les conditions de transports des voyageurs et des marchandises. Le lieu rassemble toutes les conditions techniques qui permettent l'électrification de la banlieue algéroise.

VII.4. DÉLIMITATION ET ÉTAT INITIAL DE LA ZONE

Initialement, en allant d'Alger vers Thénia, la zone ne comporte que l'ancienne voie ferrée (non électrifiée) qui était étroite et entourée d'habitations et de champs agricoles. De même, en allant d'Alger vers El affroun, la zone du projet est connue par sa biodiversité.

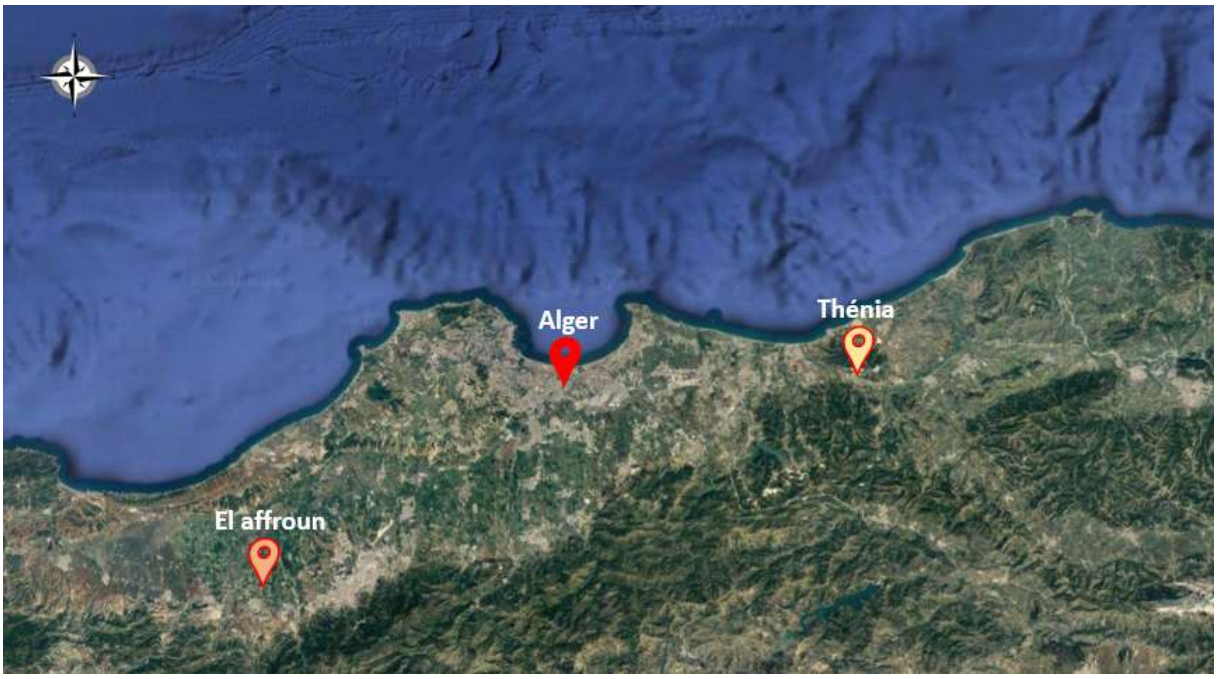


Figure VII.1. Localisation de la zone du projet

VII.5. PHASES DE PROJET

On distingue deux phases de projet :

- **Phase de construction** : elle contient la prospection préliminaire, l'installation de chantier, les travaux de génie civil, les terrassements, les remblayages en plus de la remise à l'état initial des lieux et de la gestion des déchets ;
- **Phase d'exploitation** : elle comprend l'entretien de la caténaire et de ses supports, les mesures d'hygiène et de sécurité sanitaire.

VII.6. IMPACTS ET MESURES DE PRÉVENTION, D'ATTÉNUATION OU DE COMPENSATION

VII.6.1. Phase de construction

Tableau VII.1. Impacts et mesures de prévention et d'atténuation en phase de construction

Composante de l'environnement	Source d'impact	Impact	Mesure de prévention et d'atténuation
Impact sur le milieu physique			
Eau	Nappes peu profondes interceptées par des déblais	Abaissement et assèchement de la nappe	Relèvement du niveau d'eau dans les puits, ou réalisation de puits plus profonds
	Pénétration de déchet dans les eaux de ruissellement	Contamination des ruissellements	
Sol	Terrassement et installation de chantier	Altération et changement des propriétés	Minimiser les hauteurs des terrassements ainsi que les volumes de matériaux à déplacer
	Dépôt des déblais		
Air	Manœuvre /activité de construction	Contamination de l'air par les émissions	Maitrise des émissions hydrocarbures et poussière
			Arrosage
			Couverture des camions transporteurs de matériaux
Impact sur le milieu biologique			
Faune (benthique/terrestre)	Détérioration de la qualité de l'eau et changement des pressions	Migrations des espèces à forte mobilité	Respect des périodes de repos biologique
	Vibrations et effets sonores		
Flore (benthique/terrestre)	Circulation de véhicules lourds	Perte du couvert végétal	Limitation des zones de circulation d'engins et installation de panneaux de signalisation
	Déboisement et retrait du couvert végétal		
	Dragage		
Impact sur le milieu humain			
Emploi	L'ensemble des activités du chantier	Création d'emploi	Favoriser les habitants de la région
Sécurité et santé		Propagation de maladie respiratoire	Maitrise des émissions diverses
		Risques de déversement de substances dangereuses	Mise à jour régulière des plans d'urgence

VII.6.2. Phase d'exploitation

Tableau VII.2. Impacts et mesures de prévention et d'atténuation en phase d'exploitation

Composante de l'environnement	Source d'impact	Impact	Mesure de prévention et d'atténuation
Impact sur le milieu physique			
Eau	-	Pollution et contamination	Programme de gestion des déchets
Sol	Déchet d'activité ferroviaire		
Air	Transports et manutention		
Impact sur le milieu biologique			
Faune et flore (benthique/terrestre)	Navigation, circulation de camions et présence d'infrastructures immergées	Déplacement et perte de la biodiversité	Suivi de la recolonisation de la végétation
	Bruit et vibrations		Mise au point de mesure de préservation de la qualité des eaux de surface
Impact sur le milieu humain			
Emploi	Présence de la voie électrifiée	Stimulation de l'économie locale	-
		Augmentation de rendement ferroviaire	

VII.7. CONCLUSION

La ligne ferroviaire électrifiée qui relie Alger, Thénia et El affroun, est sans conteste une infrastructure qui renforcera davantage le transport terrestre de la wilaya d'Alger, mais compte tenu des spécificités de l'activité ferroviaire, l'intégration de cette modernisation dans la zone avec le minimum de nuisances environnementales et écologiques ne peut être assurée sans la concrétisation des différentes mesures de prévention et d'atténuation citées ci-dessus ainsi que l'élaboration de planning de suivi et contrôle continu de cette infrastructure.



CONCLUSION GÉNÉRALE



CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'études consiste à étudier une infrastructure ferroviaire pour l'installation d'une caténaire 25Kv, 50 Hz, appartenant au projet « Électrification de la banlieue d'Alger ».

Dans un premier temps, il s'est avéré nécessaire de réaliser une revue bibliographique sur l'électrification d'une ligne ferroviaire, afin de se familiariser avec les différents éléments de la caténaire et de mieux comprendre les étapes d'une étude d'électrification d'une voie ferrée.

Après avoir collecté et analysé les données du site du projet, nous avons entamé l'étude géométrique qui consiste à établir un plan de piquetage qui comprend les supports de la caténaire et leur emplacement le long de la voie courante et de la gare, en respectant les normes de la SNTF et les recommandations des fiches UIC.

Une fois le plan de piquetage réalisé, nous avons sélectionné trois types de support indépendant et un portique que nous avons modélisé et dimensionné en appliquant la règlementation Algérienne et les Eurocodes. Ensuite, nous avons procédé au dimensionnement des fondations pour chaque type de support de la caténaire. Enfin, ce travail a été conclu par une étude d'impact du présent projet sur l'environnement.

En effet, le travail sur ce projet a été une occasion pour utiliser l'outil informatique tel que : Autocad, ROBOT Structural Analysis et ROBOT EXPERT, et comparer leurs résultats avec les résultats du calcul manuel pour arriver à un dimensionnement stable et adéquat économiquement. Mais aussi une occasion pour apprendre à agir face aux imprévus et au manque d'informations.

De plus, sur le plan financier, une estimation du coût du projet pour le tronçon qui nous concerne a été fournie par le maître d'ouvrage de l'ordre de 60 millions de dinars DZD par kilomètre de voie incluant la caténaire, sous-station et le système SCADA.

En perspectives, il est souhaitable d'enrichir encore plus ce travail par une étude de cas d'un tunnel et une utilisation de la méthode dynamique modale spectrale pour le calcul sismique des portiques.

Enfin, ce travail a été une véritable découverte qui nous a permis de relever le défi et faire le premier pas dans le domaine de l'électrification ferroviaire.

BIBLIOGRAPHIE

(1). **Leboeuf, Michel.** *High Speed Rail.* Paris : UIC: INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS, 2018. Disponible sur le site: https://uic.org/passenger/highspeed/.

(2). *The Economics of High Speed 2.* Londres : the Authority of the House of Lords, 2015. disponible sur le site : http://www.parliament.uk/hleconomicaffairs.

(3)**. M.Cheverry, D.Diedhiou et J.Thévenon.** *Le bruit ferroviaire en questions et réponses.* Paris : France Nature Environnement et SNCF , décembre 2018.

(4)**. D.Janssoone.** *Manuel d'exploitation ferroviaire.* Paris : Dunod, 2018.

(5)**. P.Chapas.** Voie ferrée, composant, construction et maintenance. *Technique de l'ingénieur.* [En ligne] 10 Nov 2012. [Citation : 12 04 2020.] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/ingenierie-des-transports-th14/infrastructure-ferroviaire-et-materiel-roulant.

(6)**. X.Geillon.** *La signalisation ferroviaire française.* Paris : DAVROUX Thierry, 1996**.**

(7)**. SNCF.** *Technologie ferroviaire, traction électrique.* Paris : s.n., 1971.

(8)**. S.Frey.** *Railway Electrification systems & Engineering.* Delhi : White World Publications, 2012.

(9)**. Y.Lescouarc'h.** *Les pieds de poteaux encatrés en acier.* FRANCE : CTICM, 1988. 2-902720-15-7.

(10)**. Y.Lescouarc'h.** *Initiation au calcul d'un batiment à structure en acier.* France : Impremerie nouvelle, 1997.

(11)**. Ouakli, Ahmed.** *Cours Charpente Métallique.* Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics : 2018**.**

(12)**. D.Thompson.** *Railway noise and vibrations.* UK : Elsevier Science Edition, 2010**.**

(13)**. R.A.Matheus, R.F.Weiner .** *Environmental Engineering.* USA : Elsevier Science Edition, 2003.

(14)**. S.Bazin, C.Beckerich, M.Belaplace et C.Blanquart.** *Grande vitesse ferroviaire et développement économique local.* Revue littérature de la recherche transports sécurité, N°3, Vol 3.

ANNEXE A

"Étude géométrique : Avant-projet de piquetage"

ANNEXE A : ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE, AVANT-PROJET DE PIQUETAGE

A.1. INTRODUCTION

Dans cette annexe, nous détaillerons les différents points et plans qui rentrent dans le cadre de l'étude de l'avant-projet de piquetage.

A.2. LES PORTÉES EN COURBE

Tableau A.1. Les portées en courbe à l'exclusion des clothoïdes

Rayon R (m)	Portée L (m)		Flèche de la courbe en milieu de la portée « f = $\frac{L^2}{8R}$ »
	En zone normale	En zone ventée	
$300 \leq R < 400$	31.5	31.5	413
$400 \leq R < 500$	36	36	405
$500 \leq R < 650$	40.5	40.5	410
$650 \leq R < 850$	45	45	389
$850 \leq R < 1050$	49.5	49.5	360
$1050 \leq R < 1350$	54	54	347
$1350 \leq R < 1800$	58.5	54	317
$1800 \leq R < \infty$	63	54	276

A.3. CALCUL DE LONGUEUR DE CANTON

Dans cette partie, nous détaillerons les deux critères de calcul de la longueur du canton.

A.3.1. Critère de déplacement des contrepoids

Le déplacement maximum est associe à la hauteur du fil de contact de 5.50 m, pour cette hauteur et en tenant compte d'une réserve d'espace minimale garantie de 0.7 m pour le mouvement correct des contrepoids ainsi que sur l'élévation habituel de 80 cm en niveau de poteau d'ancrage des poulies , nous avons une longueur de déplacement libre de :

$$5.50 + 0.8 - 0.7 = 5.6\,m$$

Compte tenu d'un rapport de relation de poulie de 1:5, l'allongement maximal du fil de contact est de :

$$\frac{5.6}{5} = 1.12\,m$$

Compte tenu des températures minimales de -10°C et de la température maximale de fonctionnement du câble + 80°C (une différence de 90°C). Lorsqu'une température est supposée à 35°C pour la position nominale, on aura une différence de température de 45°C. Ainsi, avec un coefficient de dilatation thermique de $17\times 10^{-6}\ K^{-1}$ la longueur maximale du demi-canton est :

$$L = \frac{\Delta L}{\propto \times \Delta T} \quad \rightarrow \quad L = \frac{0.54}{17 \times 10^{-6} \times 45} \quad \rightarrow \quad L = 700\,m$$

Avec :

- L : Longueur du demi canton ;

- ΔL = 0.54 m : Variation de la longueur due à la température, cette valeur est donnée par la norme ;
- $\Delta T = 45°C$: Différence de température entre la valeur minimale 10°C et la valeur nominale 35°C ;
- $\propto = 17 \times 10^{-6}$: Coefficient de dilatation thermique.

Par conséquent, un canton de $2\times 700 = 1400\, m$ serait compatible avec la course de déplacement des contrepoids. Evidemment, ce critère doit être mis en évidence avec les spécifications des fabricants et des fournisseurs d'équipements caténaires par suite de la sélection des fournisseurs.

A.3.2. Critère de perte du à la rotation des consoles

Le défaut d'alignement des consoles le long de la ligne aérienne de contact cause par les changements de température dans certaines situations limites, un défaut de charge mécanique dans les conducteurs du système de la caténaire. Ce défaut de charge mécanique peut atteindre des valeurs indésirables, ce qui diminue la qualité de fonctionnement de l'installation.

Le critère est que la perte de force de traction ne doit pas dépasser 8% afin de permettre d'avoir des caractéristiques de fonctionnement optimales sur toute la plage de température.

A.3.2.1. Description du phénomène

En analysant le problème selon la figure suivante, en ignorant les frottements au niveau des charnières des consoles à l'état d'équilibre, la tension mécanique des câbles est théoriquement le même avant et après l'équipement de la caténaire :

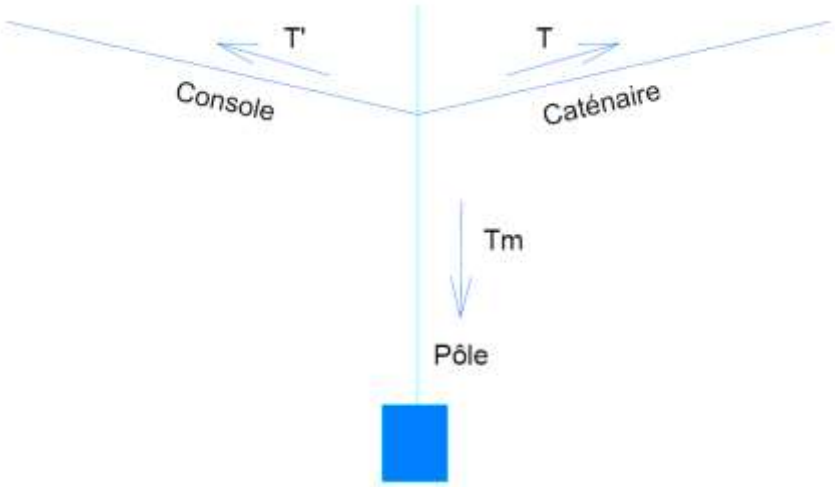


Figure A.1. Charges appliquées en courbe

Sur cette figure, $\vec{T} = \overrightarrow{T'}$ et Tm est la charge radiale provoquée par le décalage ou la courbe. La condition $\vec{T} + \overrightarrow{T'} + \overrightarrow{Tm} = 0$ est satisfaite.

Quand un évènement se produit sur la caténaire la caténaire, la console bascule et l'état d'équilibre se déplace :

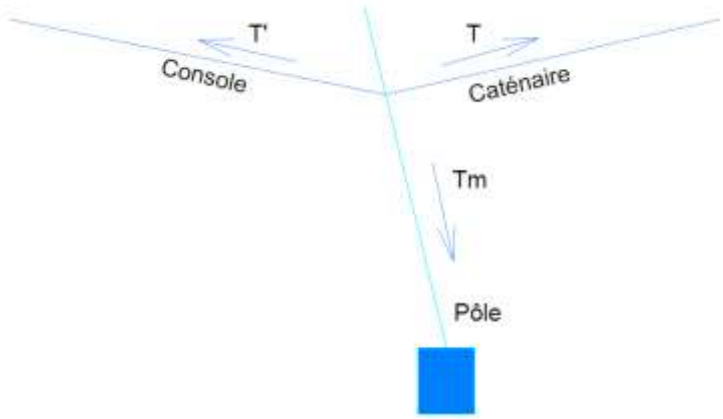


Figure A.2. Perte de charge en courbe (Expansion)

Sur cette figure, $\vec{T} \neq \overrightarrow{T'}$ en raison de l'angle formé par les axes de la console, le système étant en équilibre, la condition $\vec{T} + \overrightarrow{T'} + \overrightarrow{Tm} = 0$ reste vraie.

L'angle formé par les trois forces indique que dans le module $\left|\vec{T}\right| < \left|\overrightarrow{T'}\right|$, Ayant ainsi un déséquilibre des charges mécaniques.

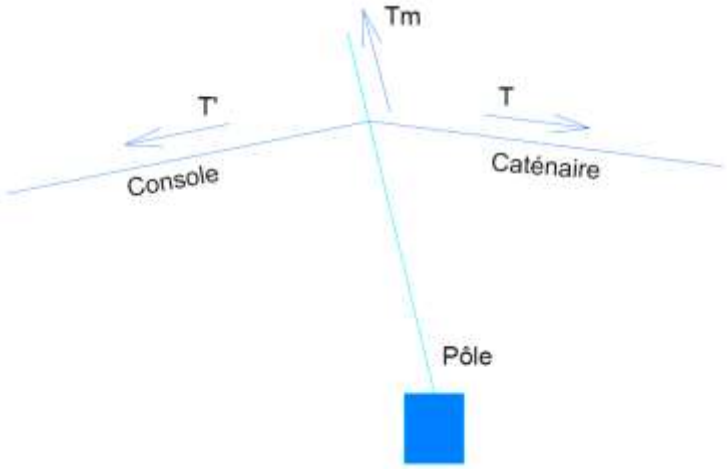


Figure A.3. Perte de charge en courbe (Push-off)

Sur cette figure, encore une foie $\vec{T} \neq \overrightarrow{T'}$, en raison de l'angle formé par $\overrightarrow{Tm}$ avec l'axe de la console. Etant le système à l'état d'équilibre, la condition $\vec{T} + \overrightarrow{T'} + \overrightarrow{Tm} = 0$ reste vraie.

Dans ce cas, contrairement à la situation d'arrachement, l'angle forme par les trois forces indique que, dans le module $\left|\vec{T}\right| < \left|\overrightarrow{T'}\right|$, présentant ainsi un gain de charge mécanique.

Cela implique que, en ligne droite, après certaines consoles, la déviation de la console neutralise les effets d'augmentation / diminution de la charge due à la déviation de la console. Ce n'est pas le cas en courbe, ou les directions d'augmentation ou diminution des charges résulte comme suit :

$$\begin{cases} (T - T')\cos\alpha + T_m \sin\beta = 0 \\ (T + T')\sin\alpha + T_m \cos\beta = 0 \end{cases}$$

De cela :

$$\frac{T'}{T} = -\frac{\sin\alpha + \cos\alpha\cot\beta}{\sin\alpha + \cos\alpha\cot\beta} = -1$$

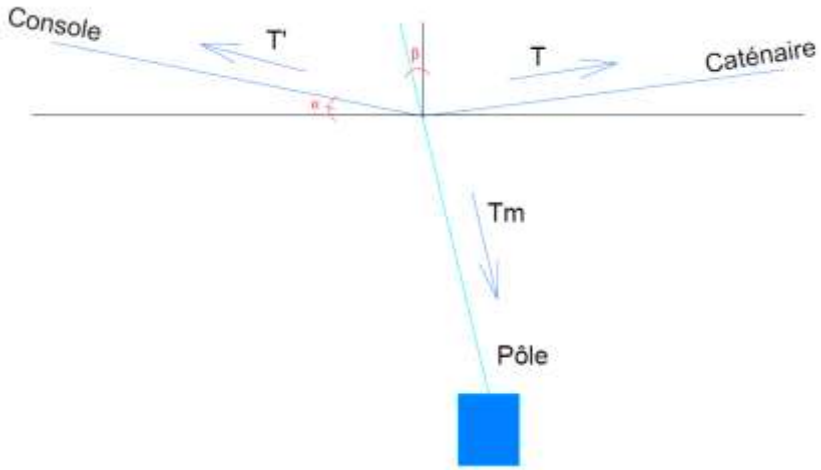


Figure A.4. Charge en courbe avec les angles

Nous déduisons que :$\alpha = 0$, $T = T'$ et le rapport T'/T peut être supérieur, inférieur ou égal à 1. Alors que, β dépend de la dilatation du fil de contact et de la distance au point milieu ; Pour la température moyenne $\beta = 0$.

En utilisant ces deux critères, et avec plus de détails, nous pouvons calculer la longueur du canton (tir).

A.4. VALEURS DES PARAMÈTRES D'UN BRANCHEMENT

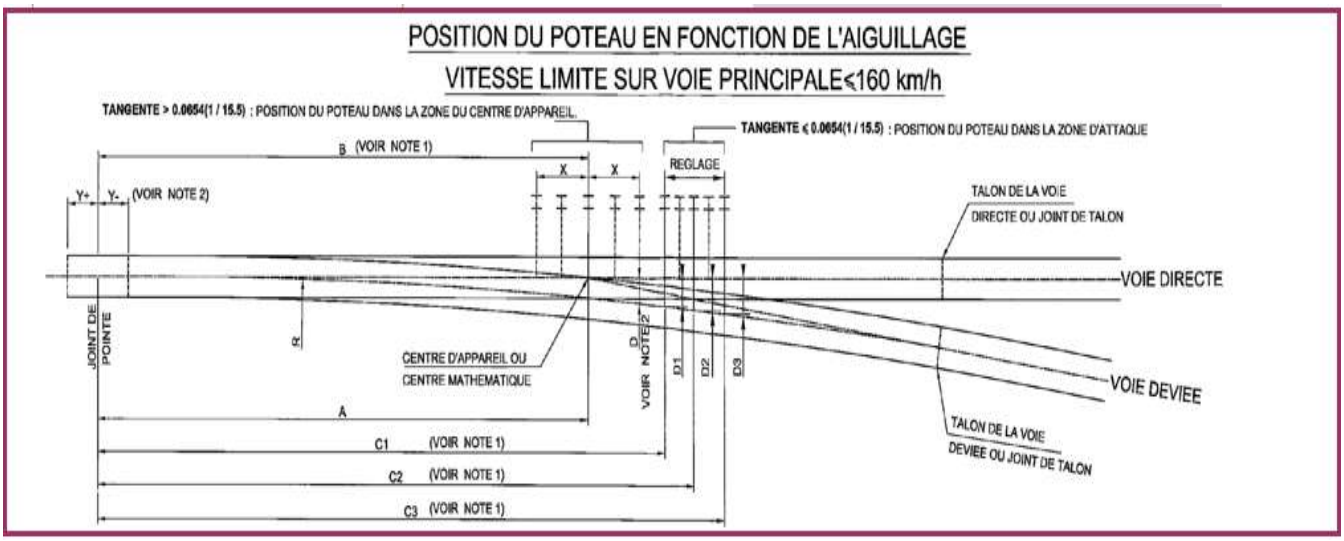


Figure A.5. Schéma détaillé d'un branchement sur voie principale

Tableau A.2. Valeurs des paramètres d'un branchement sur V.P ≤ 160 Km/h

TYPE AIGUILLAGE	TANGENTE DE l'APPAREIL	R RAYON VOIE DEVIEE	Y+ / Y- VOIR NOTE 2 (m)	V VITESSE (Km/h)	DISTANCE "A" CENTRE DE L' APPAREIL AU JOINT DE POINTE (m)	DISTANCE "B" DES POTEAUX AU AU JOINT DE POINTE (m)	PLAGE DE TOLERANCE +/- X(m)	MINIMUM		NOMINAL		MAXIMUM	
								C1 (m)	D1 (m)	C2 (m)	D2 (m)	C3 (m)	D3 (m)
1/7	0.1428	190m	+1.843	40	13.50	13.50	1.40						
1/9	0.1111	190m	-1.427	40	10.52	16.61	1.80						
1/9	0.1111	300m	-0.946	40	16.61	16.61	1.80						
1/12	0.0833	190m	-	40	-	-	2.40						
1/12	0.0833	500m	+ 0.339	60	20.80	20.80	2.40						
1/18.5	0.054	1200m	-	100	32.77			36.36	0.54	39.55	0.64	42.50	0.74
1/21	0.0476	1540m	-	100	36.64			40.78	0.54	44.40	0.64	47.74	0.74

A.4. TYPES DES ISOLATEURS DE SECTION

La vitesse de circulation de la ligne déterminera le type d'Isolateur de section :

- Isolateur double entrée ;
- Isolateur à masse concentrée ;
- Isolateur à grande vitesse.

A.4.1. Isolateur double entrée

L'isolateur à double entrée avec patins en fil de contact, permet une circulation de 40 km/h.

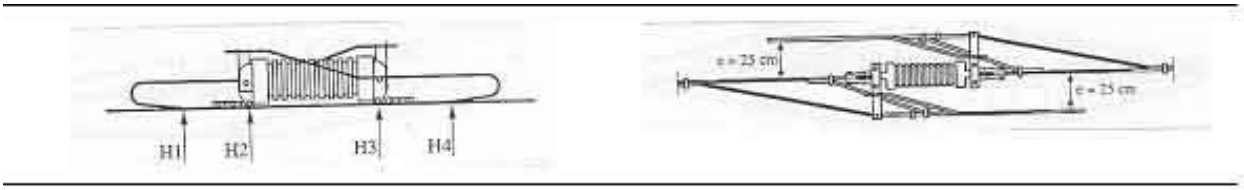


Figure A.6. Isolateur double entrée

A.4.2. Isolateur à masse concentrée

L'isolateur à masse concentrée permet quant à lui une circulation de 90 km/h dans le sens préférentiel et de 60 km/h dans le sens inverse.

A.4.3. Isolateur à grande vitesse

L'isolateur à grande vitesse peut être franchi à 120 km/h.

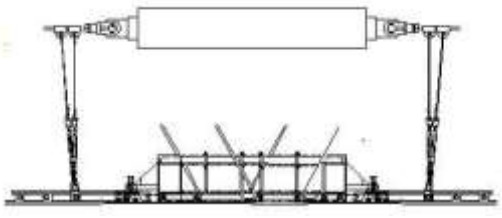
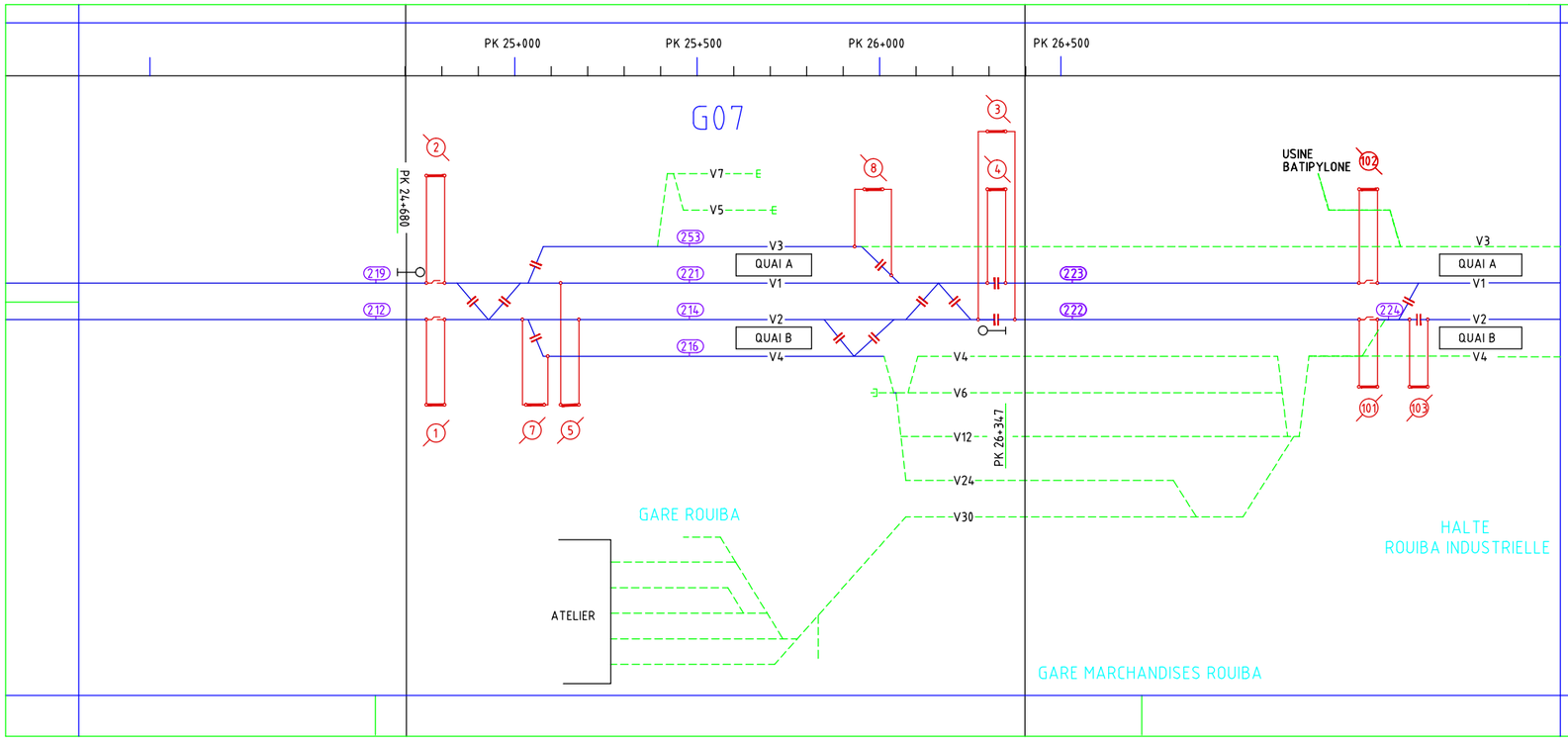


Figure A.7. Isolateur à grande vitesse



LEGENDE

- Signal d'entrée
- G.. Section de gare
- H.. Section de halte
- 0.. Section pleine voie
- LB INTERRUPTEUR DE CHARGE
- SECTIONNEUR
- SECTIONNEUR AVEC TALON DE TERRE
- ISOLATEUR DE SECTION
- SECTIONNEMENT A LAME D'AIR
- ISOLATEUR DE FEEDER DE RENFORT
- TRANSFORMATEUR DE COURANT (T C)
- TRANSFORMATEUR DE TENSION (T T)
- XYY NUMEROTATION SECTION ELEMENTAIRE

X : numéro de la sous-station alimentant la section:
1=Hamma
2=Reghaia
3=Beni mered

YY numéro d'ordre de la section élémentaire

DANS UN MODE DE FONCTIONNEMENT NORMAL, CES APPAREILS SERONT INSTALER DANS LA POSITION (OUVERT OU FERMER) TEL QUE DESSINE SUR LE S.A.S.

- VOIES A ELECTRIFIER
- VOIES EN CONSTRUCTION A ELECTRIFIER
- VOIES PROJETEES A ELECTRIFIER
- VOIES NON ELECTRIFIEES
- FEEDER DE RENFORT
- FEEDER D'ALIMENTATION

SCHEMA D'ALIMENTATION ET DE SECTIONNEMENT (S.A.S.)

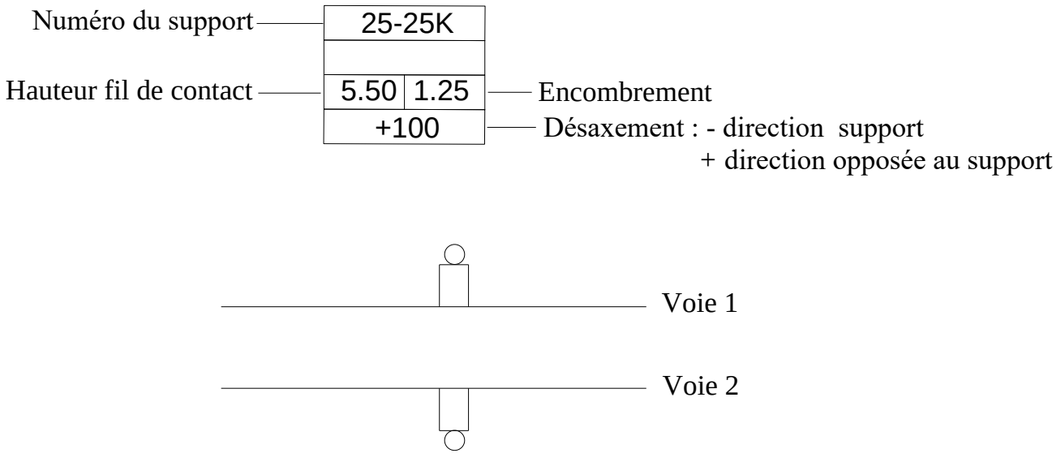
Thème: Etude d'une infrastructure ferroviaire pour l'installation d'une caténaire 25KV, 50Hz; Projet d'électrification de la Banlieue d'Alger.	**CHAPITRE IV**: Etude géométrique; Avant-Projet de piquetage	**Titre du plan:** Schéma d'Alimentation et de Sectionnement "Rouiba"	**Echelle:** 1/1000

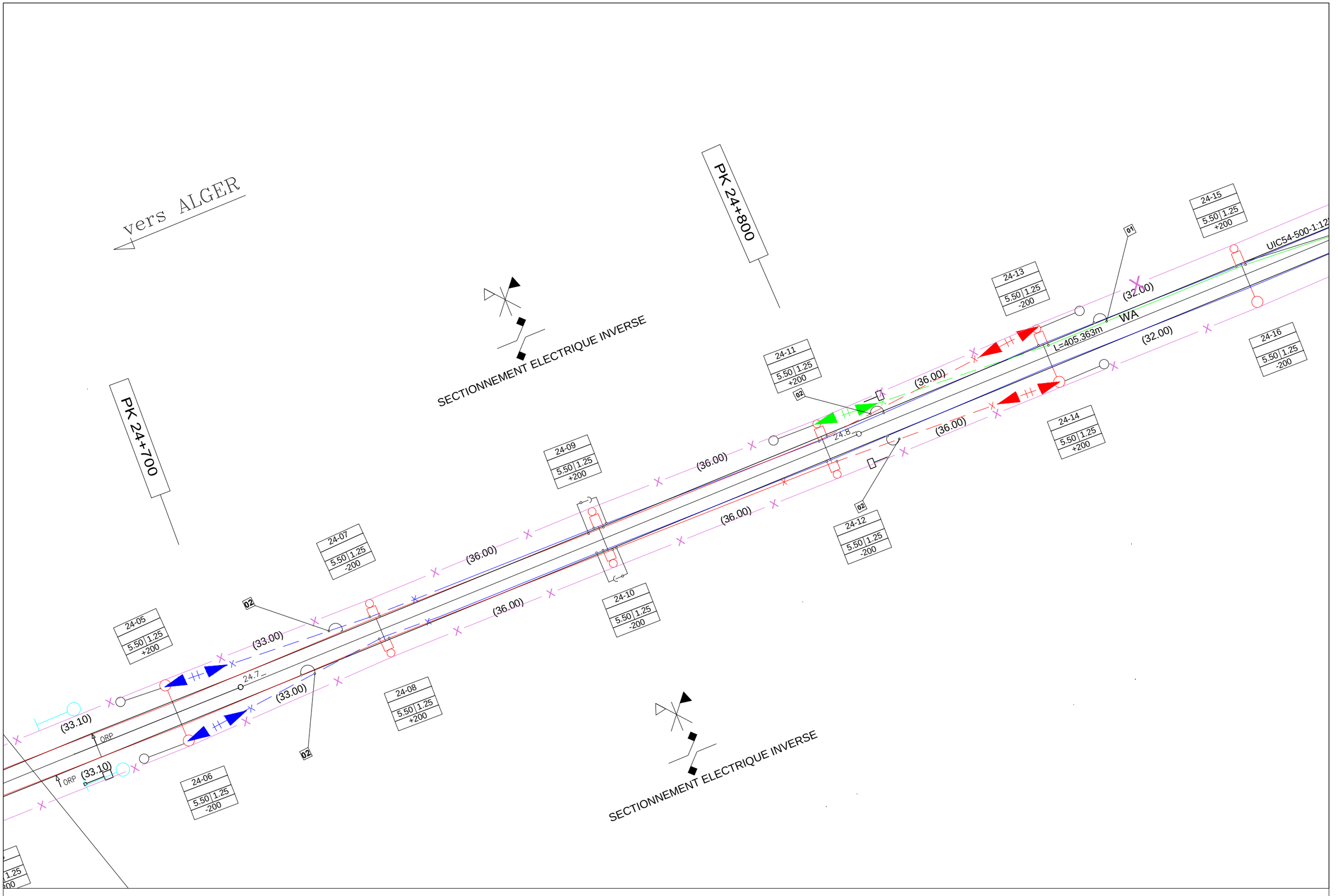
ENSTP
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Build and Ground works engineering

LEGENDE:

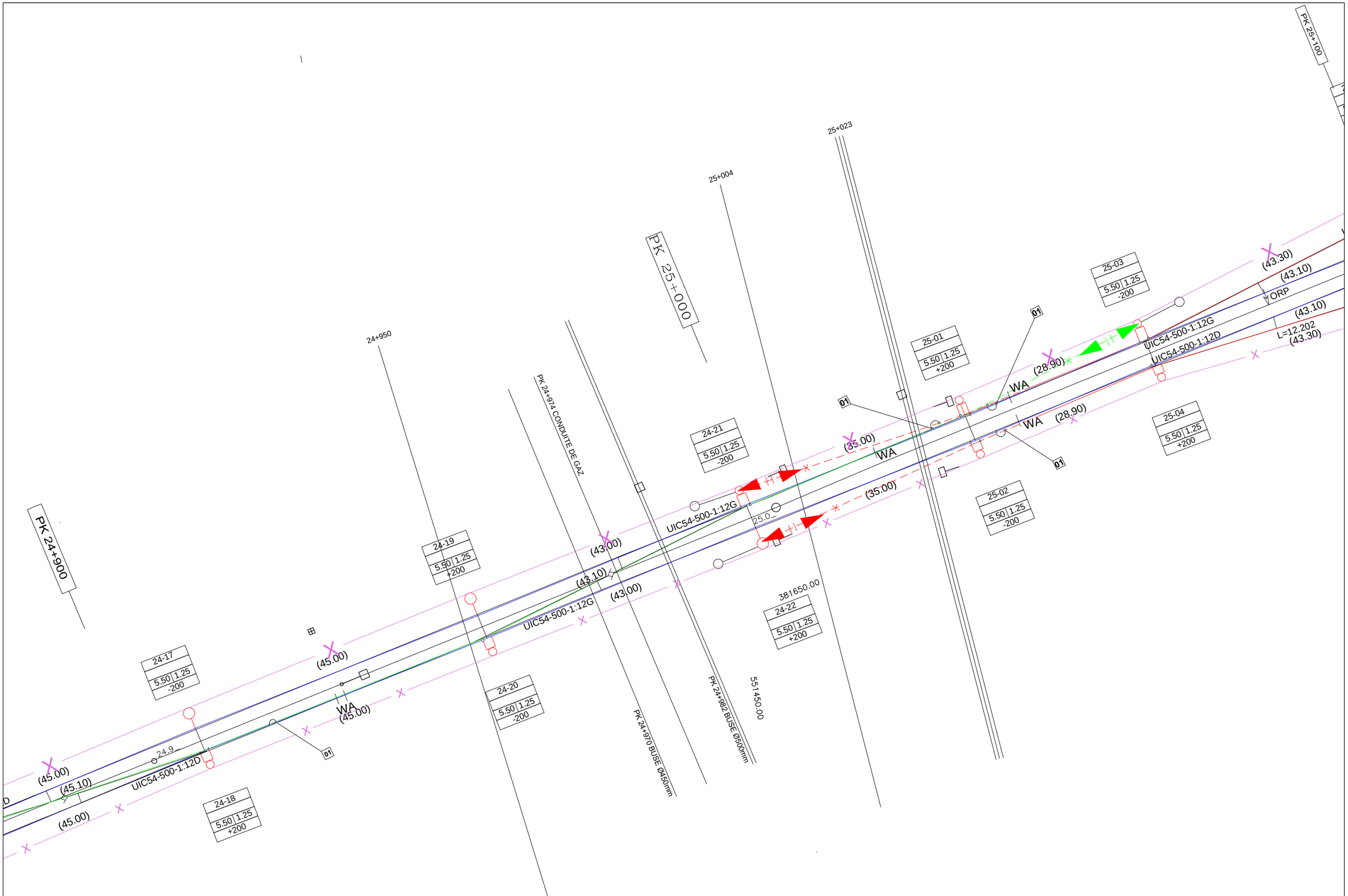
- Support
- Console simple
- Console double
- Console triple
- Portique
- Axe anticheminement
- Ancrage du câble d'anticheminement
- Ancrage du câble avec équipement tendeur
- Ancrage du câble sans équipement tendeur
- Isolateur intermédiaire
- Ancrage
- Ancrage à 4.5 m
- Chaise armement simple
- Ancrage mural ou sous ouvrage
- Support mural ou sous ouvrage

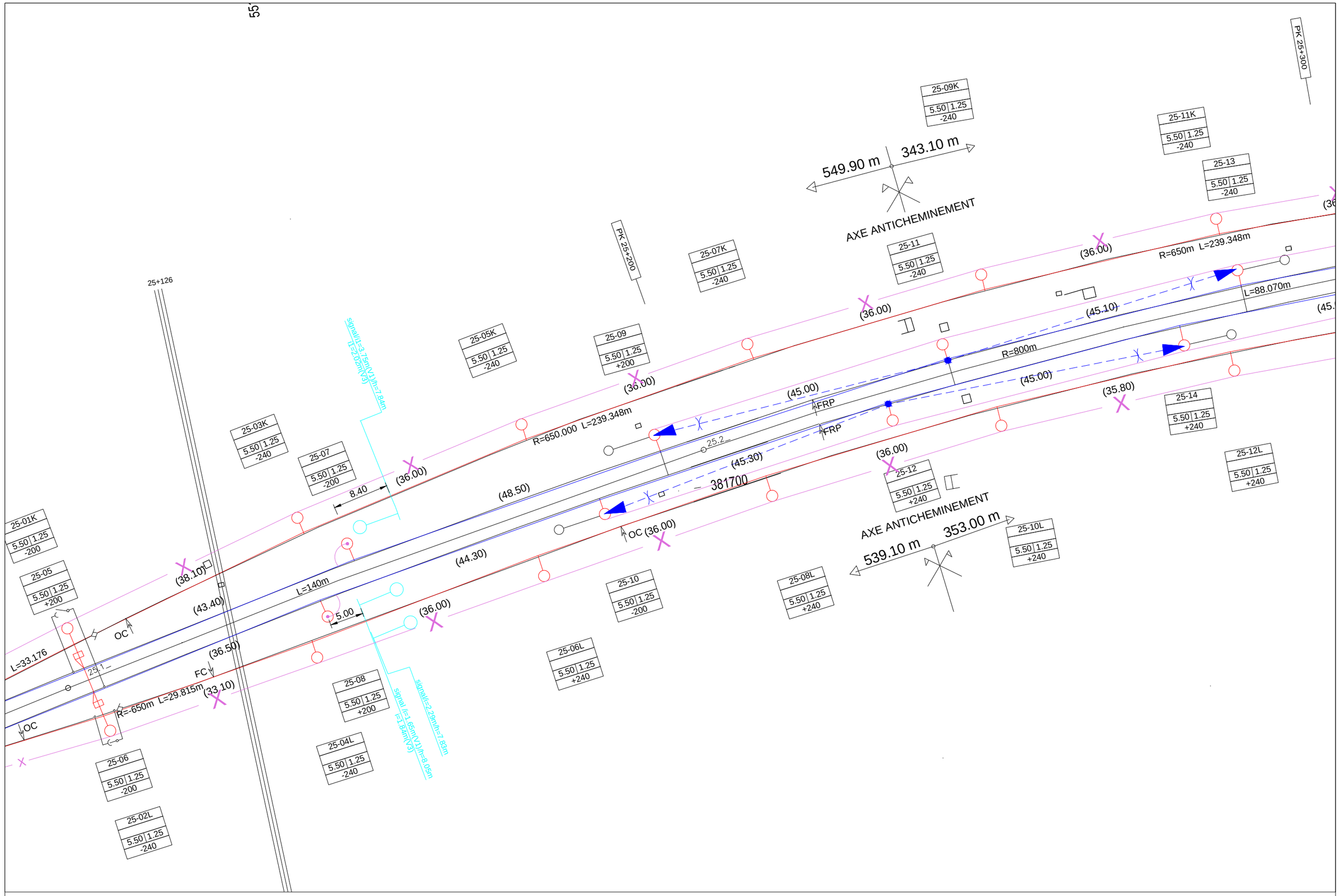
- Sectionnement électrique
- Equipement tendeur
- Isolateur de section
- 25-28 Numéro de support
- (63.00) Portée
- Caténaire
- Caténaire relevée
- Câble de protection aérien
- Support connecté au rail
- 01 Connexion continuité pour équipement tendeur
- 02 Connexion d'équipotentialité pour sectionnement électrique

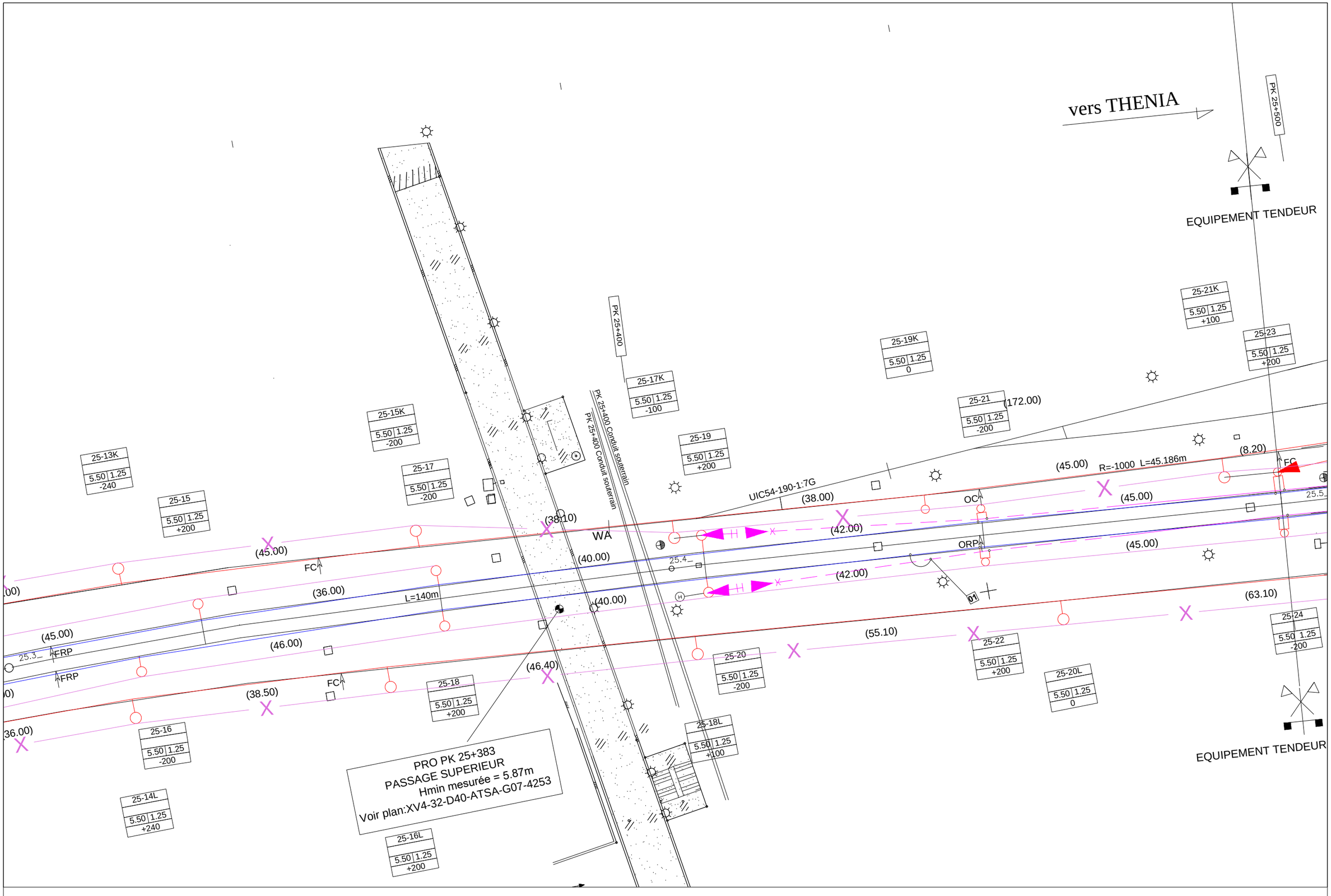


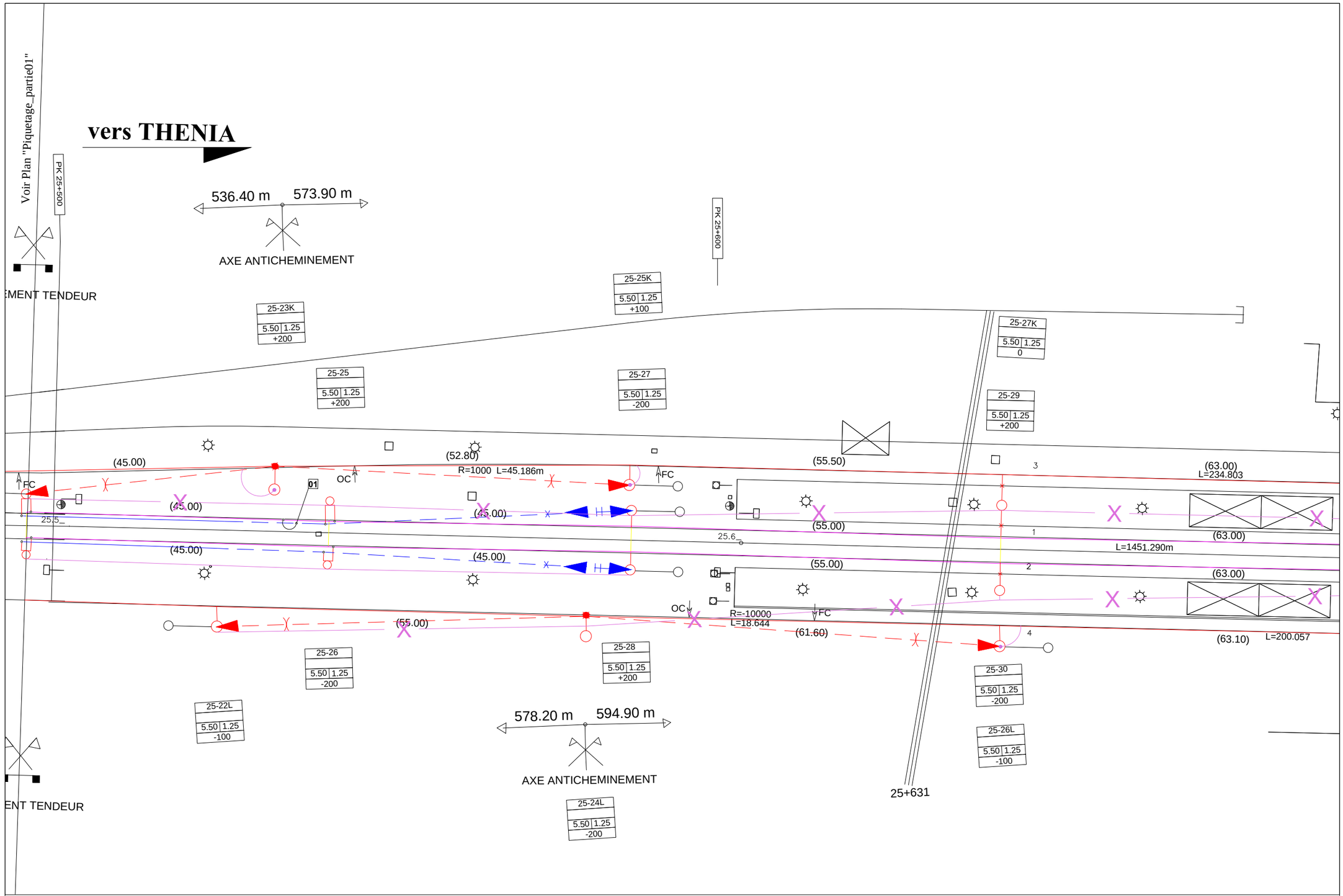


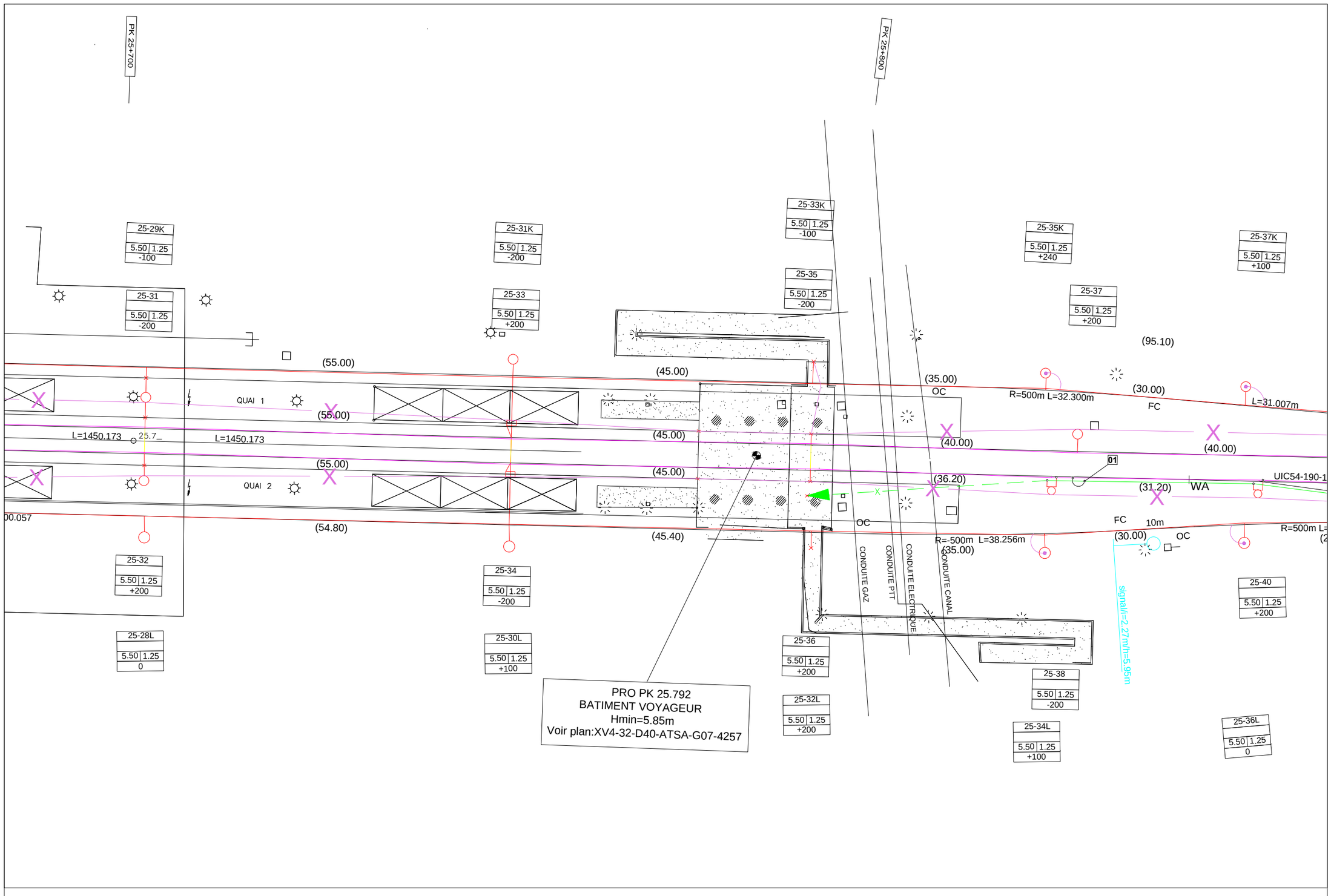
THÈME : Étude d'une infrastructure ferroviaire pour l'installation d'une caténaire 25 kV, 50 Hz Projet : « Électrification de la banlieue d'Alger »	CHAPITRE IV. Étude géométrique, avant-projet de piquetage	Echelle : 1/1000	Page : 100

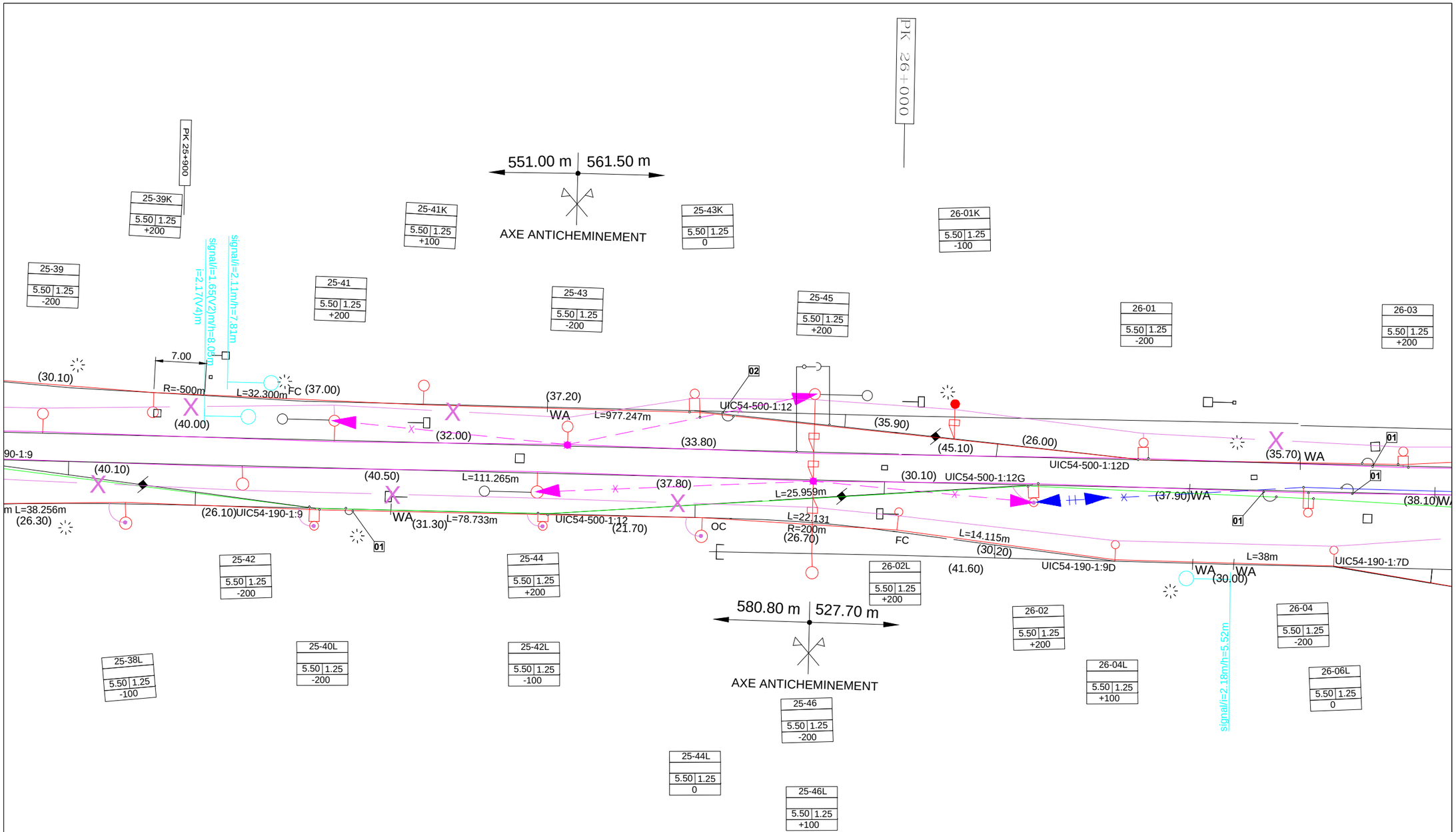

PK 25+100
PK 25+000
PK 24+950
PK 24+900
25+023
25+004
PK 24+974 CONDUITE DE GAZ
PK 24+970 BUSE Ø450mm
PK 24+982 BUSE Ø500mm
551450.00
381650.00
25-01
5.50 | 1.25
+200
25-03
5.50 | 1.25
-200
25-04
5.50 | 1.25
+200
25-02
5.50 | 1.25
-200
24-21
5.50 | 1.25
-200
24-19
5.50 | 1.25
+200
24-17
5.50 | 1.25
-200
24-20
5.50 | 1.25
-200
24-22
5.50 | 1.25
+200
24-18
5.50 | 1.25
+200
UIC54-500-1:12G
UIC54-500-1:12D
ORP
L=12.202
WA
01
(43.30)
(43.10)
(28.90)
(35.00)
(43.00)
(45.00)
(45.10)
25.0
24.9

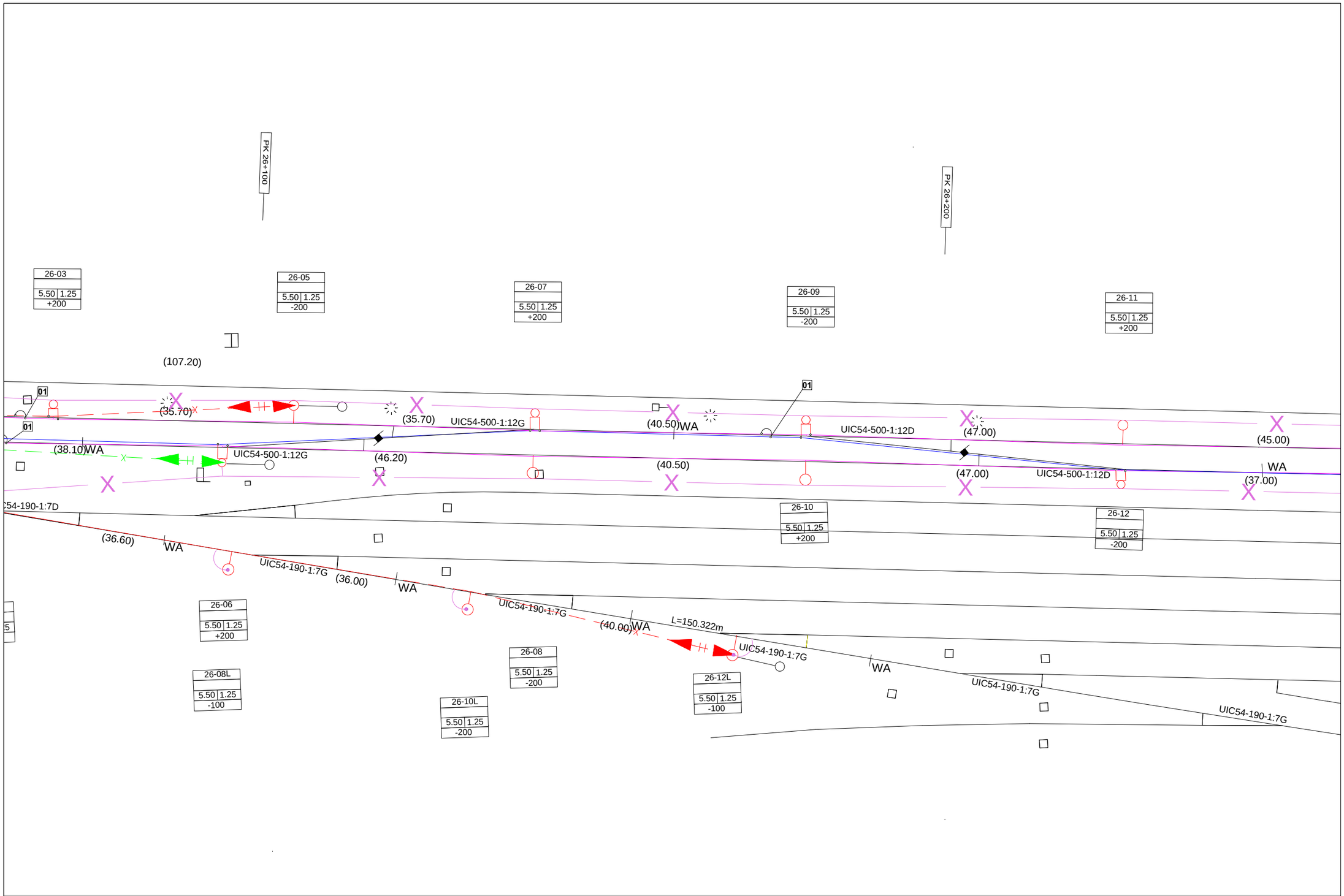

PK 25+300
PK 25+200
25+126
549.90 m
343.10 m
AXE ANTICHEMINEMENT
539.10 m
353.00 m
AXE ANTICHEMINEMENT
381700
R=650.000 L=239.348m
R=650m L=239.348m
R=800m
L=88.070m
L=140m
L=33.176
R=-650m L=29.815m
signal/i=3.75m(V1)/h=7.84m
I=2.20m(V3)
signal/i=1.65m(V1)/h=8.05m
I=1.84m(V3)
signal/i=2.29m/h=7.83m
FRP
FRP
OC
OC
OC (36.00)
FC
8.40
5.00
25.2
(36.00)
(45.00)
(45.30)
(48.50)
(38.10)
(43.40)
(44.30)
(36.50)
(33.10)
(45.10)
(35.80)
25-01K
5.50 | 1.25
-200
25-02L
5.50 | 1.25
-240
25-03K
5.50 | 1.25
-240
25-04L
5.50 | 1.25
-240
25-05
5.50 | 1.25
+200
25-05K
5.50 | 1.25
-240
25-06
5.50 | 1.25
-200
25-06L
5.50 | 1.25
+240
25-07
5.50 | 1.25
-200
25-07K
5.50 | 1.25
-240
25-08
5.50 | 1.25
+200
25-08L
5.50 | 1.25
+240
25-09
5.50 | 1.25
+200
25-09K
5.50 | 1.25
-240
25-10
5.50 | 1.25
-200
25-10L
5.50 | 1.25
+240
25-11
5.50 | 1.25
-240
25-11K
5.50 | 1.25
-240
25-12
5.50 | 1.25
+240
25-12L
5.50 | 1.25
+240
25-13
5.50 | 1.25
-240
25-14
5.50 | 1.25
+240

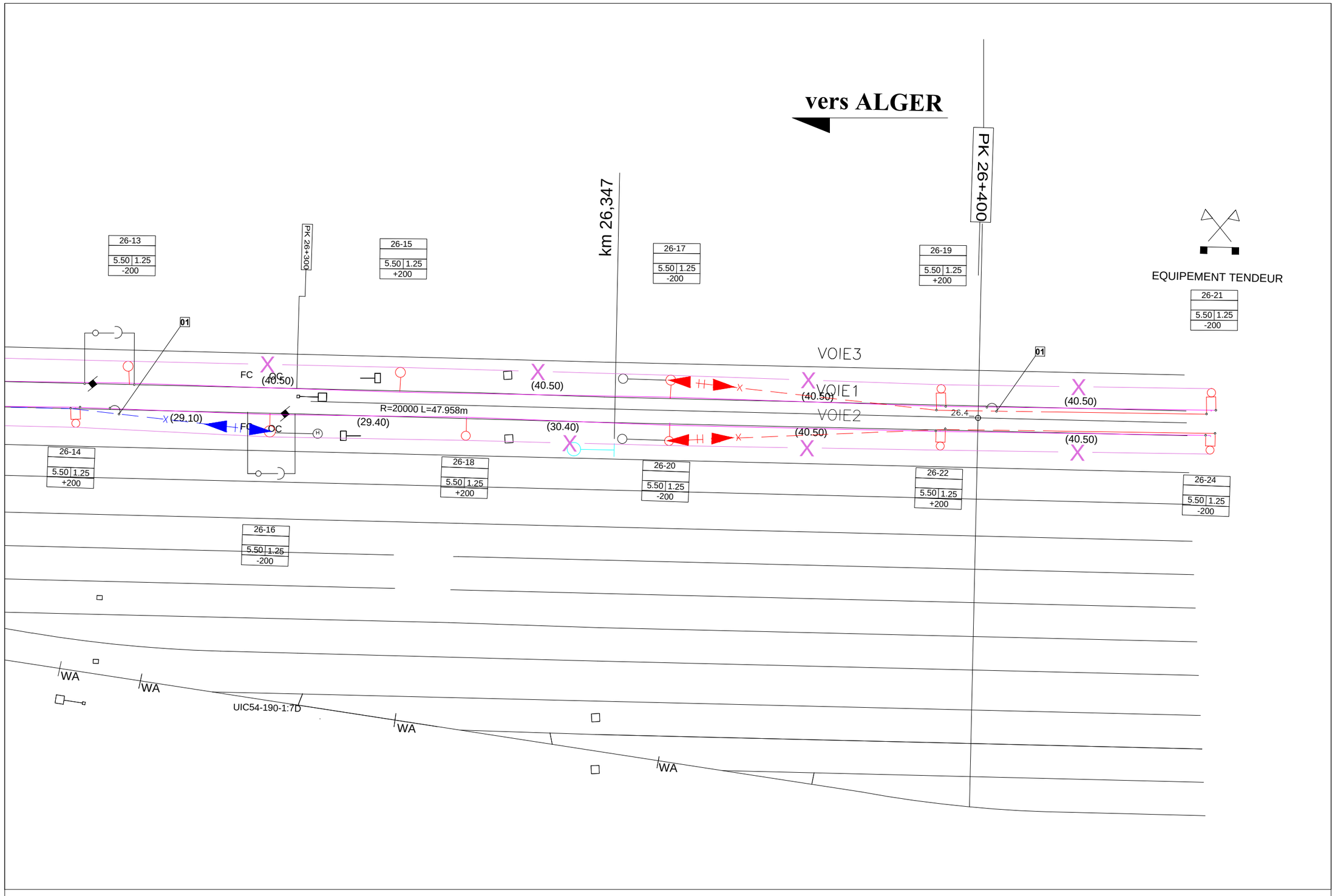

vers THENIA
PK 25+500
EQUIPEMENT TENDEUR
PK 25+400
PK 25+400 Conduit souterrain
25-13K
5.50 1.25
-240
25-15K
5.50 1.25
-200
25-15
5.50 1.25
+200
25-17
5.50 1.25
-200
25-17K
5.50 1.25
-100
25-19
5.50 1.25
+200
25-19K
5.50 1.25
0
25-21
5.50 1.25
-200
25-21K
5.50 1.25
+100
25-23
5.50 1.25
+200
25-24
5.50 1.25
-200
25-22
5.50 1.25
+200
25-20
5.50 1.25
-200
25-20L
5.50 1.25
0
25-18
5.50 1.25
+200
25-18L
5.50 1.25
+100
25-16
5.50 1.25
-200
25-16L
5.50 1.25
+200
25-14L
5.50 1.25
+240
(172.00)
(8.20)
(45.00)
R=-1000 L=45.186m
UIC54-190-1:7G
(38.00)
OC
(45.00)
(42.00)
(38.10)
WA
(40.00)
ORP
(45.00)
FC
(36.00)
L=140m
(40.00)
(42.00)
(45.00)
(63.10)
25.4
25.3
FRP
FRP
(46.00)
(55.10)
(38.50)
FC
(46.40)
01
PRO PK 25+383
PASSAGE SUPERIEUR
Hmin mesurée = 5.87m
Voir plan:XV4-32-D40-ATSA-G07-4253
EQUIPEMENT TENDEUR


vers THENIA
Voir Plan "Piquetage_partie01"
PK 25+500
536.40 m
573.90 m
AXE ANTICHEMINEMENT
EMENT TENDEUR
PK 25+600
25-23K
5.50 1.25
+200
25-25K
5.50 1.25
+100
25-25
5.50 1.25
+200
25-27
5.50 1.25
-200
25-27K
5.50 1.25
0
25-29
5.50 1.25
+200
(45.00)
(52.80)
R=1000 L=45.186m
(55.50)
(63.00)
L=234.803
FC
OC
01
25.5
25.6
(55.00)
L=1451.290m
R=-10000
L=18.644
(61.60)
(63.10)
L=200.057
25-26
5.50 1.25
-200
25-28
5.50 1.25
+200
25-30
5.50 1.25
-200
25-22L
5.50 1.25
-100
25-26L
5.50 1.25
-100
578.20 m
594.90 m
AXE ANTICHEMINEMENT
ENT TENDEUR
25-24L
5.50 1.25
-200
25+631


PK 25+700
PK 25+800
25-29K
5.50 | 1.25
-100
25-31K
5.50 | 1.25
-200
25-33K
5.50 | 1.25
-100
25-35K
5.50 | 1.25
+240
25-37K
5.50 | 1.25
+100
25-31
5.50 | 1.25
-200
25-33
5.50 | 1.25
+200
25-35
5.50 | 1.25
-200
25-37
5.50 | 1.25
+200
(55.00)
(45.00)
(35.00)
OC
R=500m L=32.300m
(30.00)
FC
L=31.007m
(95.10)
QUAI 1
L=1450.173
25.7
L=1450.173
(55.00)
(45.00)
(40.00)
(40.00)
(55.00)
(45.00)
01
UIC54-190-1
QUAI 2
(36.20)
(31.20)
WA
00.057
(54.80)
(45.40)
OC
FC
10m
(30.00)
OC
R=-500m L=38.256m
(35.00)
R=500m L=
(2
CONDUITE GAZ
CONDUITE PTT
CONDUITE ELECTRIQUE
CONDUITE CANAL
signal/=2.27m/h=5.95m
25-32
5.50 | 1.25
+200
25-34
5.50 | 1.25
-200
25-40
5.50 | 1.25
+200
25-28L
5.50 | 1.25
0
25-30L
5.50 | 1.25
+100
25-36
5.50 | 1.25
+200
25-38
5.50 | 1.25
-200
25-32L
5.50 | 1.25
+200
25-34L
5.50 | 1.25
+100
25-36L
5.50 | 1.25
0
PRO PK 25.792
BATIMENT VOYAGEUR
Hmin=5.85m
Voir plan:XV4-32-D40-ATSA-G07-4257


PK 26+000
PK 25+900
551.00 m
561.50 m
AXE ANTICHEMINEMENT
25-39K
5.50 | 1.25
+200
25-41K
5.50 | 1.25
+100
25-43K
5.50 | 1.25
0
26-01K
5.50 | 1.25
-100
25-39
5.50 | 1.25
-200
25-41
5.50 | 1.25
+200
25-43
5.50 | 1.25
-200
25-45
5.50 | 1.25
+200
26-01
5.50 | 1.25
-200
26-03
5.50 | 1.25
+200
signal//i=1.65(V2)m/h=8.08m
i=2.17(V4)m
signal//i=2.11m/h=7.81m
7.00
R=-500m
L=32.300m
FC (37.00)
(30.10)
(40.00)
(32.00)
(37.20)
WA
L=977.247m
02
UIC54-500-1:12
(33.80)
(35.90)
(45.10)
(26.00)
UIC54-500-1:12D
(35.70) WA
01
90-1:9
(40.10)
(40.50)
L=111.265m
(37.80)
(30.10)
UIC54-500-1:12G
L=25.959m
(37.90)WA
(38.10)WA
m L=38.256m
(26.30)
(26.10)UIC54-190-1:9
WA
(31.30)
L=78.733m
UIC54-500-1:12
(21.70)
OC
L=22.131
R=200m
(26.70)
FC
L=14.115m
(30.20)
(41.60)
UIC54-190-1:9D
L=38m
UIC54-190-1:7D
WA
(30.00)
WA
25-42
5.50 | 1.25
-200
25-44
5.50 | 1.25
+200
26-02L
5.50 | 1.25
+200
580.80 m
527.70 m
AXE ANTICHEMINEMENT
26-02
5.50 | 1.25
+200
26-04
5.50 | 1.25
-200
25-38L
5.50 | 1.25
-100
25-40L
5.50 | 1.25
-200
25-42L
5.50 | 1.25
-100
26-04L
5.50 | 1.25
+100
26-06L
5.50 | 1.25
0
signal//i=2.18m/h=5.52m
25-46
5.50 | 1.25
-200
25-44L
5.50 | 1.25
0
25-46L
5.50 | 1.25
+100


PK 26+100
PK 26+200
26-03
5.50 | 1.25
+200
26-05
5.50 | 1.25
-200
26-07
5.50 | 1.25
+200
26-09
5.50 | 1.25
-200
26-11
5.50 | 1.25
+200
(107.20)
01
(35.70)
(35.70)
UIC54-500-1:12G
(40.50)WA
UIC54-500-1:12D
(47.00)
(45.00)
(38.10)WA
UIC54-500-1:12G
(46.20)
(40.50)
(47.00)
UIC54-500-1:12D
WA
(37.00)
C54-190-1:7D
(36.60)
WA
UIC54-190-1:7G
(36.00)
WA
UIC54-190-1:7G
(40.00)WA
L=150.322m
UIC54-190-1:7G
WA
UIC54-190-1:7G
UIC54-190-1:7G
26-10
5.50 | 1.25
+200
26-12
5.50 | 1.25
-200
26-06
5.50 | 1.25
+200
26-08L
5.50 | 1.25
-100
26-10L
5.50 | 1.25
-200
26-08
5.50 | 1.25
-200
26-12L
5.50 | 1.25
-100


vers ALGER
PK 26+400
km 26,347
PK 26+300
EQUIPEMENT TENDEUR
26-13
5.50 1.25
-200
26-15
5.50 1.25
+200
26-17
5.50 1.25
-200
26-19
5.50 1.25
+200
26-21
5.50 1.25
-200
VOIE3
VOIE1
VOIE2
01
FC
OC
(40.50)
(29.10)
(29.40)
(30.40)
R=20000 L=47.958m
26.4
26-14
5.50 1.25
+200
26-18
5.50 1.25
+200
26-20
5.50 1.25
-200
26-22
5.50 1.25
+200
26-24
5.50 1.25
-200
26-16
5.50 1.25
-200
WA
UIC54-190-1:7D

ANNEXE B

"Sectionnement et pendulage"

ANNEXE B : SECTIONNEMENT ET PENDULAGE

B.1. INTRODUCTION

Dans cette annexe, nous exposerons les plans de détails sur le sectionnement à lame d'air et l'anti-cheminement ainsi que le tableau de répartition des pendules en fonction de la portée.

B.2. PENDULAGE

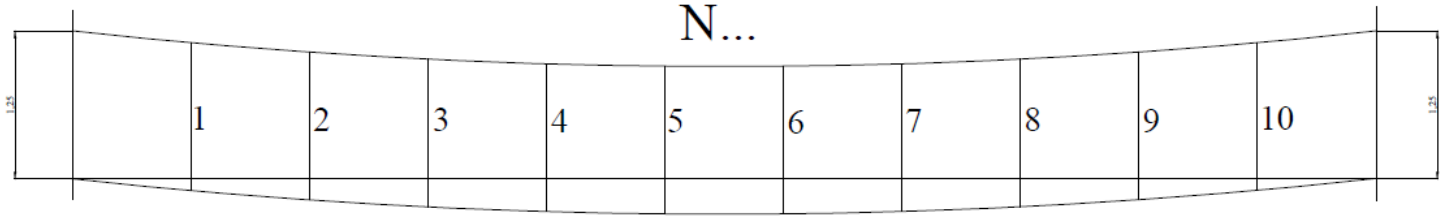


Figure B.1. Répartition des pendules sur une portée

Tableau B.1. Longueur des pendules et la distance entre eux en fonction de la portée

Repère de pendulage		Numéro des pendules											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
N63 (63,00m) e=1,25	Distance entre pendules (m)	2,250	6,750	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	6,750	2,250			
	Longueur des pendules (m) L	1,157	0,976	0,808	0,724	0,724	0,808	0,976	1,157				L
	Longueur des pendules (m) ℓ	1,09	0,91	0,74	0,66	0,66	0,74	0,91	1,09				ℓ
N58,5 (58,50m) e=1,25	Distance entre pendules (m)	2,250	6,750	6,750	9,000	9,000	9,000	6,750	6,750	2,250			
	Longueur des pendules (m) L	1,163	1,002	0,886	0,805	0,805	0,886	1,002	1,163				L
	Longueur des pendules (m) ℓ	1,10	0,94	0,82	0,74	0,74	0,82	0,94	1,10				ℓ
N54 (54,00m) e=1,25	Distance entre pendules (m)	2,250	6,750	9,000	9,000	9,000	9,000	6,750	2,250				
	Longueur des pendules (m) L	1,170	1,029	0,910	0,871	0,910	1,029	1,170					L
	Longueur des pendules (m) ℓ	1,11	0,96	0,85	0,81	0,85	0,96	1,11					ℓ
N49,5 (49,50m) e=1,25	Distance entre pendules (m)	2,250	6,750	6,750	9,000	9,000	6,750	6,750	2,250				
	Longueur des pendules (m) L	1,177	1,055	0,976	0,938	0,976	1,055	1,177					L
	Longueur des pendules (m) ℓ	1,11	0,99	0,91	0,87	0,91	0,99	1,11					ℓ
N45 (45,00m) e=1,25	Distance entre pendules (m)	2,250	6,750	9,000	9,000	9,000	6,750	2,250					
	Longueur des pendules (m) L	1,184	1,082	1,010	1,010	1,082	1,184						L
	Longueur des pendules (m) ℓ	1,12	1,02	0,94	0,94	1,02	1,12						ℓ
N40,5 (40,50m) e=1,25	Distance entre pendules (m)	2,250	6,750	6,750	9,000	6,750	6,750	2,250					
	Longueur des pendules (m) L	1,190	1,107	1,063	1,063	1,107	1,190						L
	Longueur des pendules (m) ℓ	1,13	1,04	1,00	1,00	1,04	1,13						ℓ
N36 (36,00m) e=1,25	Distance entre pendules (m)	2,250	6,750	9,000	9,000	6,750	2,250						
	Longueur des pendules (m) L	1,197	1,134	1,104	1,134	1,197							L
	Longueur des pendules (m) ℓ	1,13	1,07	1,04	1,07	1,13							ℓ
N31,5 (31,50m) e=1,25	Distance entre pendules (m)	2,250	6,750	6,750	6,750	6,750	2,250						
	Longueur des pendules (m) L	1,204	1,159	1,144	1,159	1,204							L
	Longueur des pendules (m) ℓ	1,14	1,09	1,08	1,09	1,14							ℓ
N27 (27,00m) e=1,25	Distance entre pendules (m)	2,250	6,750	9,000	6,750	2,250							
	Longueur des pendules (m) L	1,211	1,185	1,185	1,211								L
	Longueur des pendules (m) ℓ	1,15	1,12	1,12	1,15								ℓ

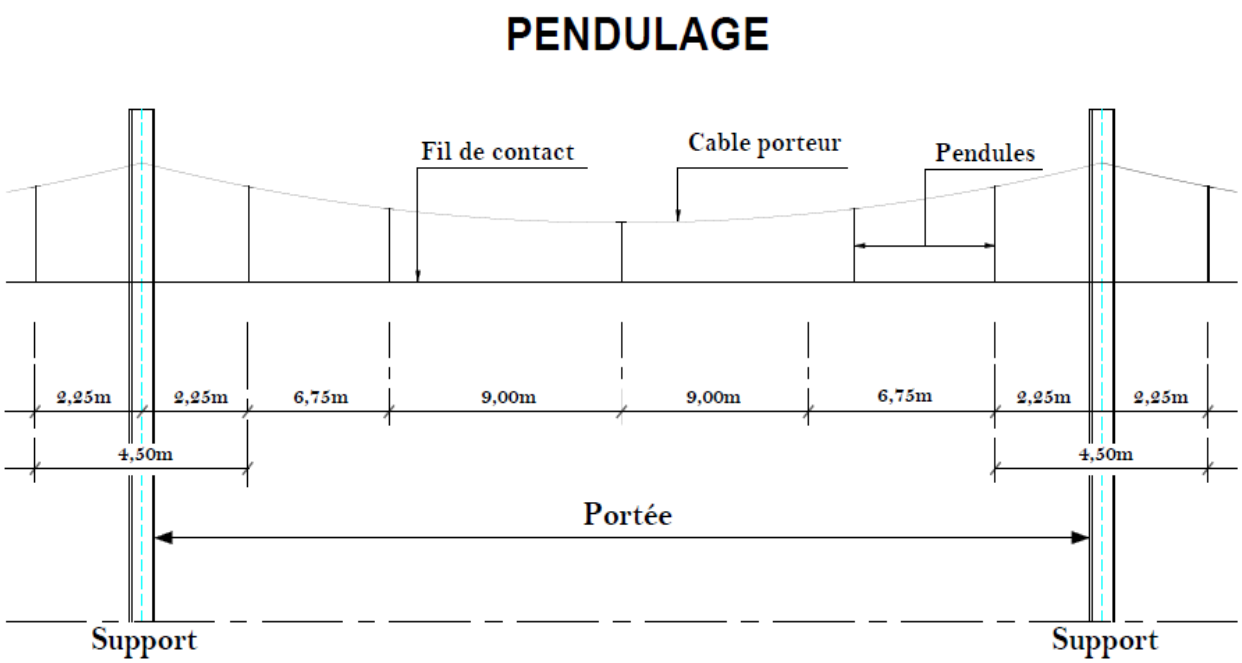


Figure B.2. Pendulage type en coupe longitudinale

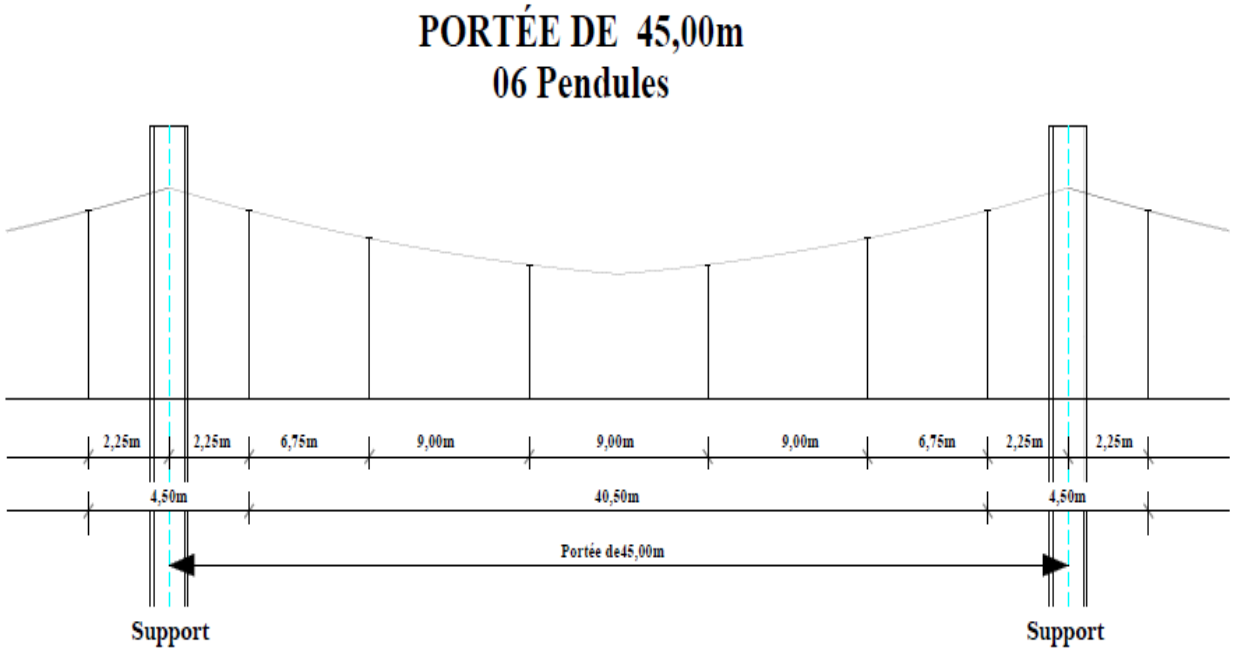


Figure B.3. Pendulage d'une portée de 45m en coupe longitudinale

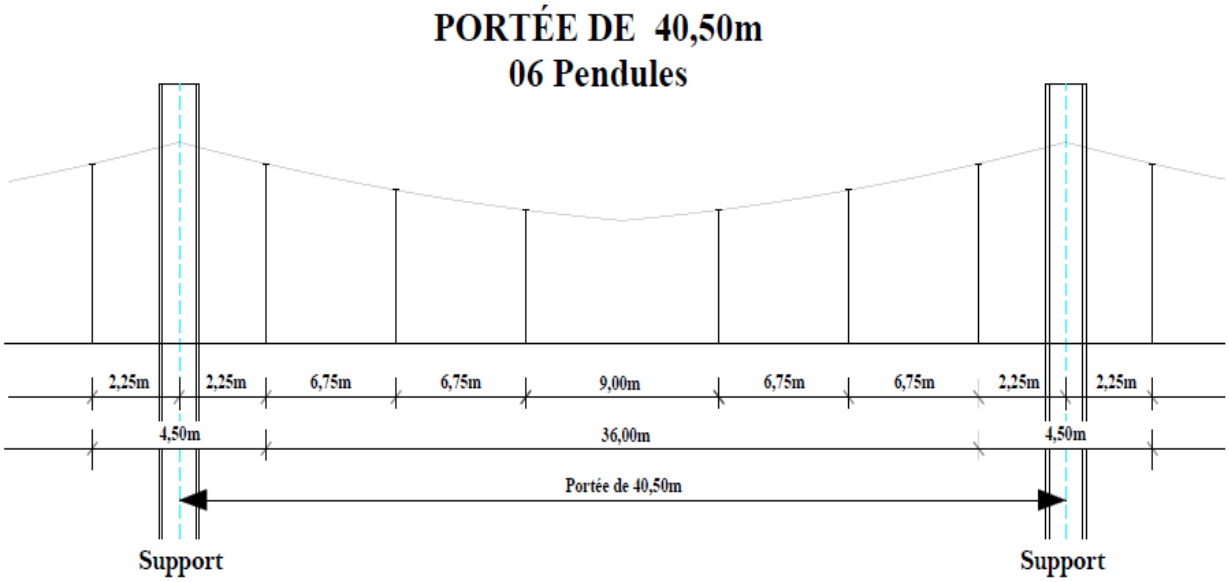


Figure B.4. Pendulage d'une portée de 40.5m en coupe longitudinale

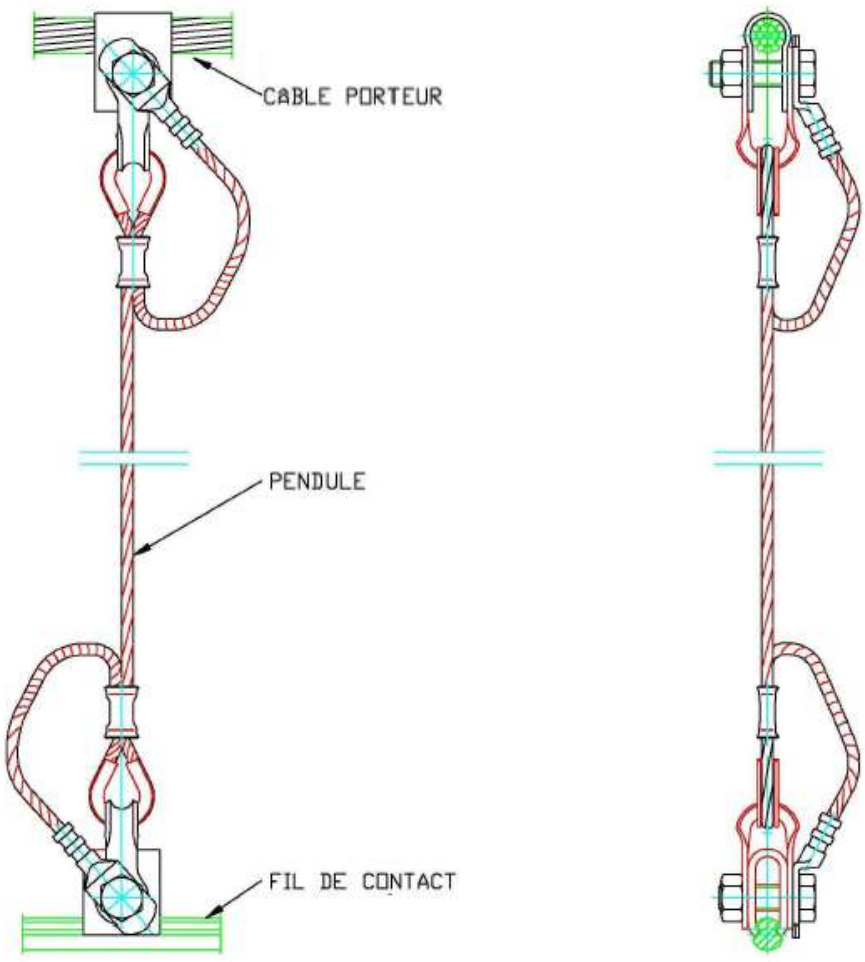
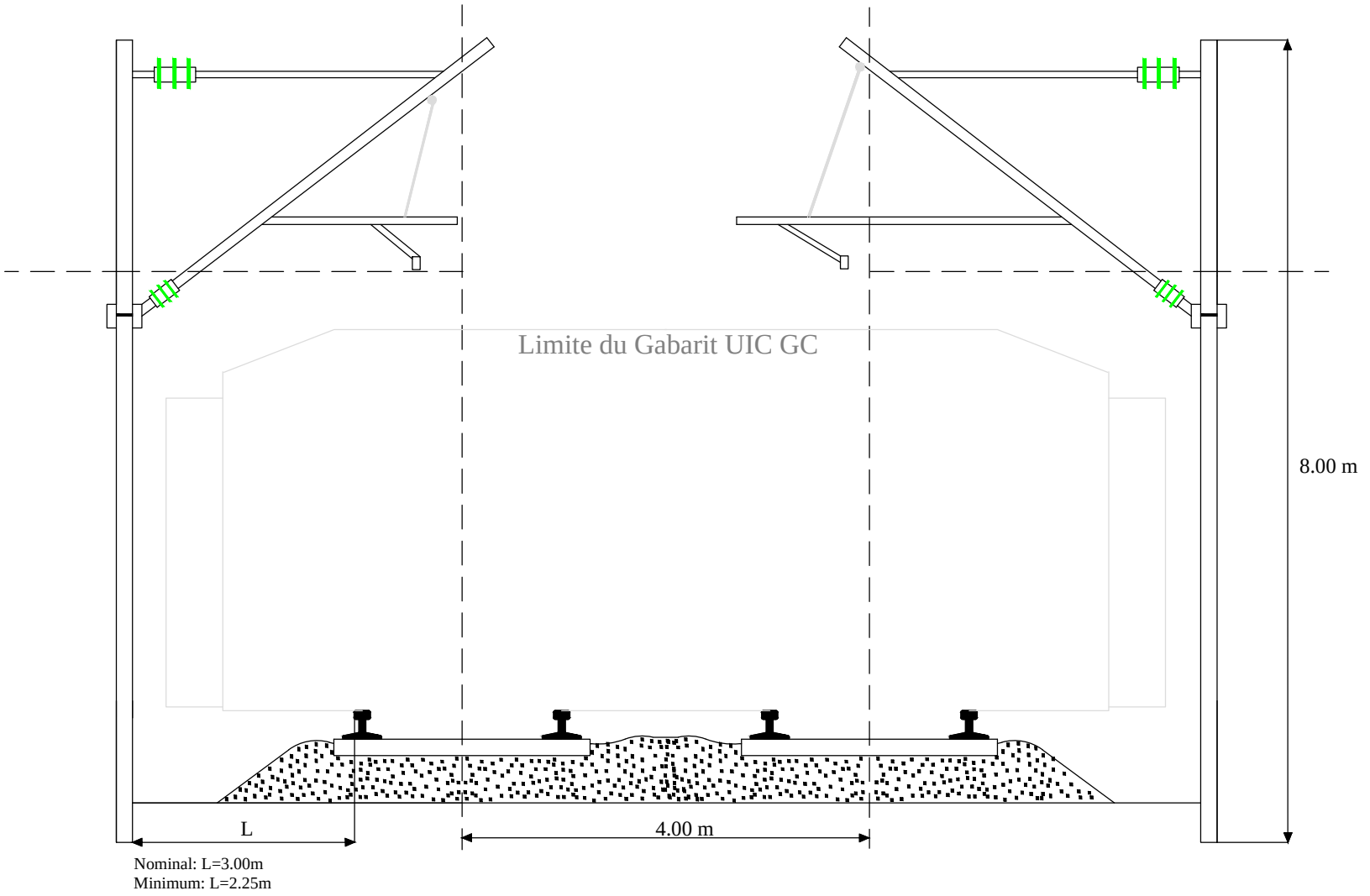


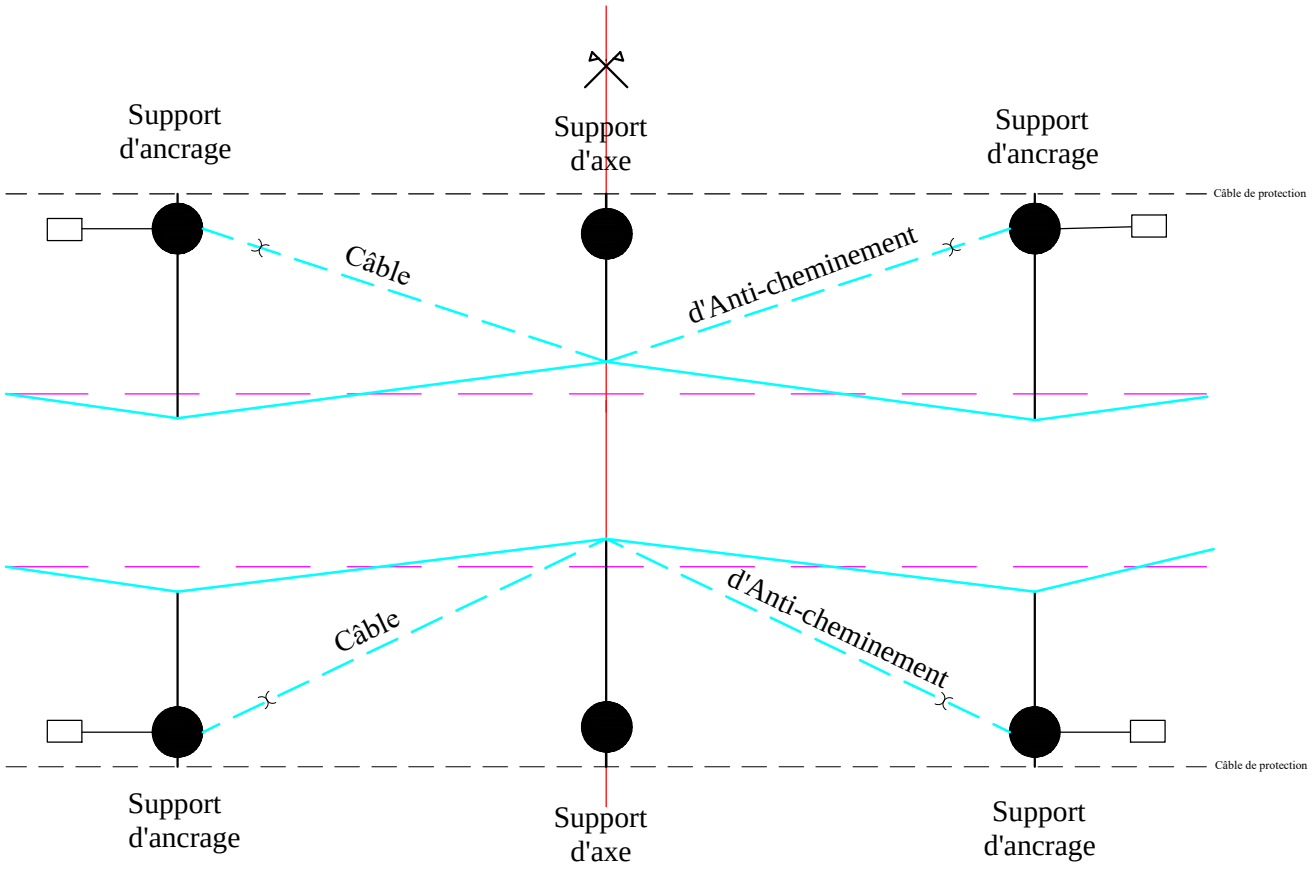
Figure B.5. Pendules



Thème: Etude d'une infrastructure ferroviaire pour l'installation d'une caténaire 25KV, 50Hz; Projet d'électrification de la Banlieue d'Alger.	**CHAPITRE IV**: Etude géométrique: Avant-projet de piquetage	**Titre du plan:** Voie en alignement Coupe transversale	**Echelle:** 1/1000

ENSTP
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Build and Ground works engineering

ANTICHEMINEMENT



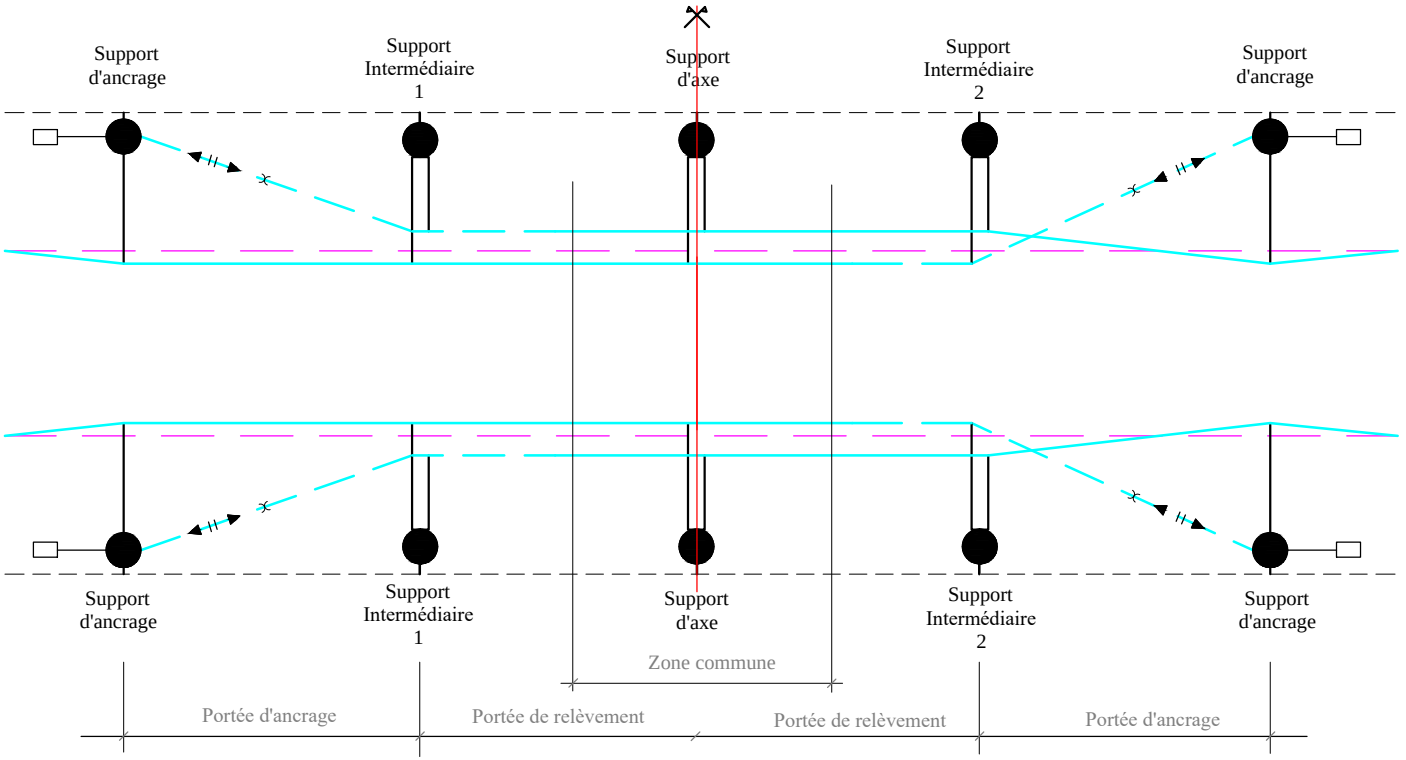
LEGENDE:

- Caténaire
- Voie
- Cable de protection aérien
- Support d'ancrage
- Support avec 1 console
- Ancrage
- Isolateur

Thème: Etude d'une infrastructure ferroviaire pour l'installation d'une caténaire 25KV, 50Hz; Projet d'électrification de la Banlieue d'Alger.	**CHAPITRE IV**: Etude géométrique; Avant-Projet de piquetage	**Titre du plan:** ANTICHEMINEMENT	**Echelle:** 1/1000

ENSTP
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Build and Ground works engineering

SECTIONNEMENT À LAME D'AIR



LEGENDE:

- Caténaire
- Voie
- Cable de protection aérien
- Support d'ancrage
- Support avec 2 consoles
- Ancrage
- Isolateur
- Appareil tendeur

Thème: Etude d'une infrastructure ferroviaire pour l'installation d'une caténaire 25KV, 50Hz; Projet d'électrification de la Banlieue d'Alger.	**CHAPITRE IV**: Etude géométrique; Avant-Projet de piquetage	**Titre du plan:** SECTIONNEMENT à LAME D'AIR	**Echelle:** 1/1000	**Page:**

ANNEXE C

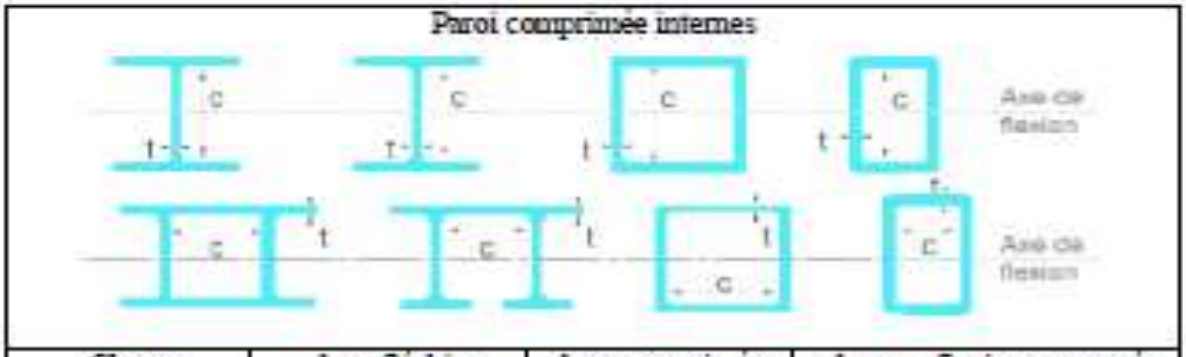
"Dimensionnement des supports de la caténaire"

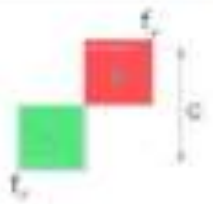
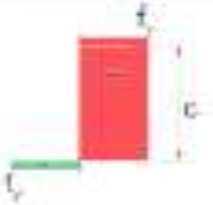
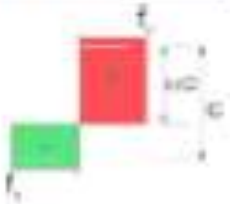
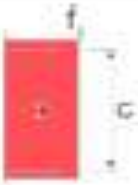
ANNEXE C : DIMENSIONNEMENT DES SUPPORTS DE LA CATÉNAIRE

C.1. INTRODUCTION

La présente annexe regroupe l'ensemble des documents techniques (abaques et tableaux) qui ont servi au dimensionnement des supports de la caténaire (Chapitre V). Les détails de la modélisation de ceux-ci avec le logiciel Robot Structural Analysis ainsi que leurs notes de calcul issues du programme EXCEL sont également exposés.

C.2. CLASSIFICATION DE LA SECTION

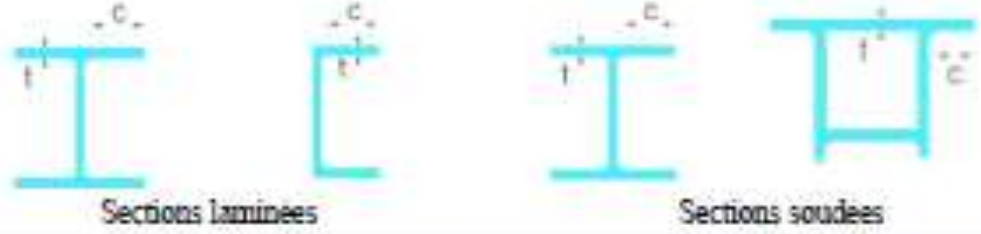


Classe	Ame fléchie	Ame comprimée	Ame en flexion composé
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)			
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	lorsque $\alpha > 0{,}5$; $c/t \leq 396\varepsilon/(13\alpha - 1)$ lorsque $\alpha < 0{,}5$; $c/t \leq 36\varepsilon/\alpha$
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	lorsque $\alpha > 0{,}5$; $c/t \leq 456\varepsilon/(13\alpha - 1)$ lorsque $\alpha < 0{,}5$; $c/t \leq 41{,}5\varepsilon/\alpha$
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)			
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	lorsque $\Psi > -1$; $c/t \leq 42\varepsilon/(0{,}67 + 0{,}33\Psi)$ lorsque $\Psi < -1$; $c/t \leq 62\varepsilon\,(1 - \Psi)\sqrt{(-\Psi)}$

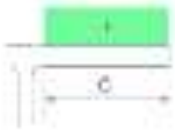
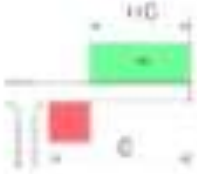
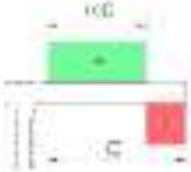
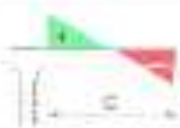
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y (N/mm²)	235	275	355	420	460
	ε	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71

Figure C.1. Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées (classification d'âme)

semelles en console :



Sections laminées — Sections soudées

Classe	Type de classe	Paroi comprimée	Paroi en flexion composée	
			Bord comprimé	Bord tendu
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)				
1	Laminées	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Soudées	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	Laminées	$c/t \leq 11\varepsilon$	$c/t \leq \frac{11\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{11\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Soudées	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)				
3	Laminées	$c/t_f \leq 15\varepsilon$	$c/t_f \leq 23\varepsilon\sqrt{K_\sigma}$	
	Soudées	$c/t_f \leq 14\varepsilon$	$c/t_f \leq 21\varepsilon\sqrt{K_\sigma}$	
			Pour K_σ voir tableau 5.3.3	

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y (N/mm²)	235	275	350	420	460
	ε	1	0,92	0.81	0,75	0.71

Figure C.2. Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées (classification de semelle)

C.3. PARAMÈTRES DU FLAMBEMENT

C.3.1. Facteur d'imperfection α

Tableau C.1. Valeurs du paramètres d'imperfection

Courbe de flambement	a_0	a	b	c	d
Facteur d'imperfection α	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

C.3.2. Courbes de flambement

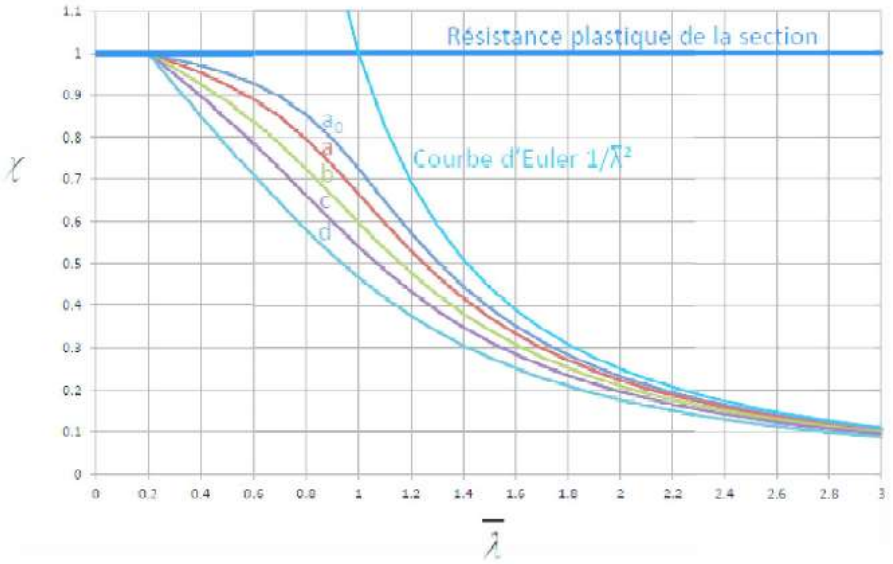


Figure C.3. Courbes de flambement (EC3)

C.3.3. Choix de la courbe de flambement en fonction de la section

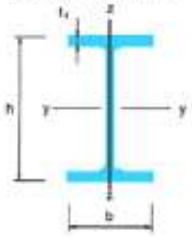
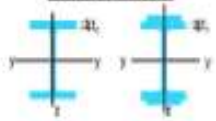
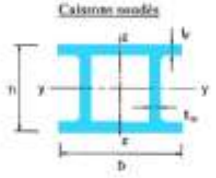
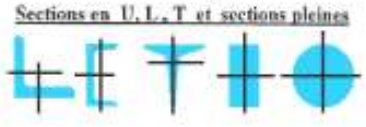
Type de section	limites	Axe de flambement	Courbe de flambement
Sections en I laminées 	$\frac{h}{b} > 1,2$: $t_f \leq 40\ mm$.	y-y z-z	a b
	$40\ mm < t_f \leq 100\ mm$.	y-y z-z	b c
	$\frac{h}{b} \leq 1,2$ $t_f \leq 100\ mm$	y-y z-z	b c
	$t_f > 100\ mm$	y-y z-z	d d
Sections en I soudées 	$t_f \leq 40\ mm$.	y-y z-z	b c
	$t_f > 40\ mm$	y-y z-z	c d
Sections creuses 	Laminees a chaud	Quel qu'il soit	a
	Formées à froid -en utilisant f_{yb}	Quel qu'il soit	b
	Formees a froid -en utilisant f_{ya}	Quel qu'il soit	c
Caissons soudés 	D'une manière générale (sauf ci - dessous)	Quel qu'il soit	b
	Souchures épaisses et : $\frac{b}{t_f} < 30$ $\frac{h}{t_w} < 30$	y-y z-z	c c
Sections en U, L, T et sections pleines 		Quel qu'il soit	c
L'axe de flambement est perpendiculaire au plan de flexion (plan de déformation)			

Figure C.4. Choix de la courbe de flambement selon les sections transversales

C.3.4. Calcul du coefficient de réduction χ

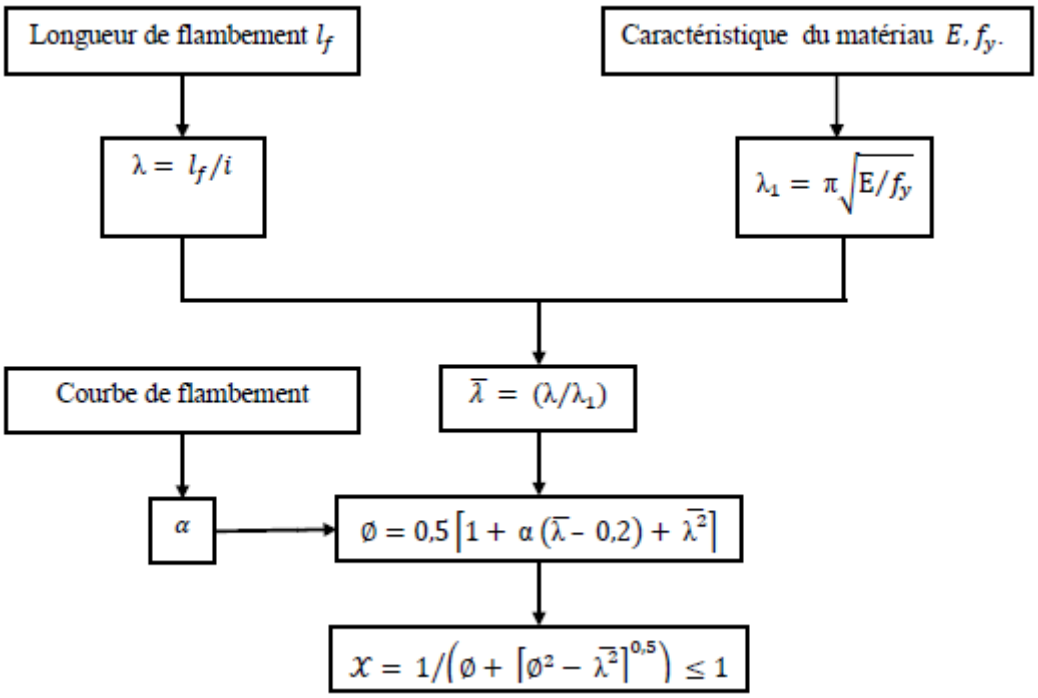


Figure C.5. Organigramme de calcul du coefficient de réduction χ

C.4. MODÉLISATION ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

C.4.1. Support avec une seule console, section HEA 240

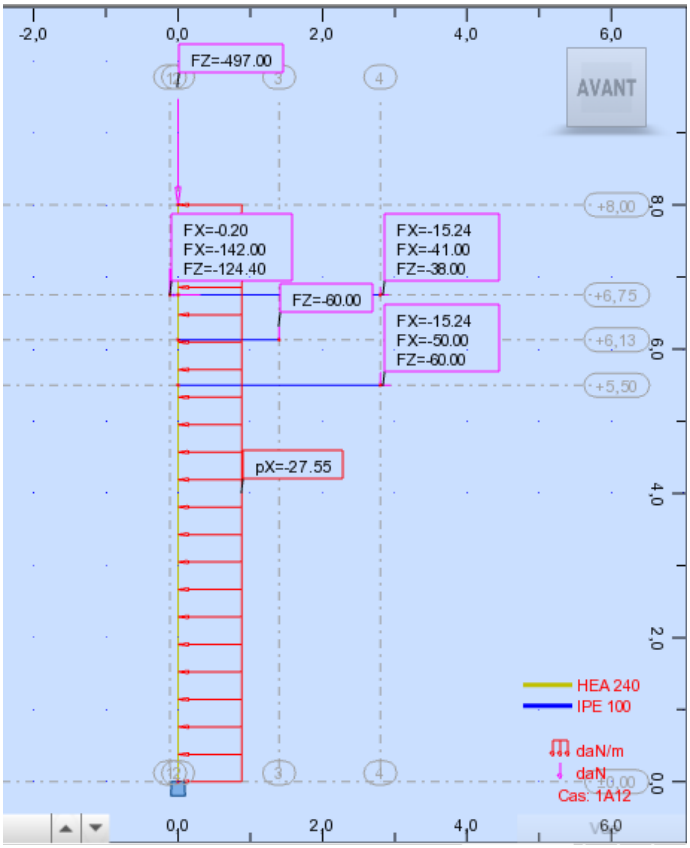


Figure C.6. Schéma statique du support HEA 240

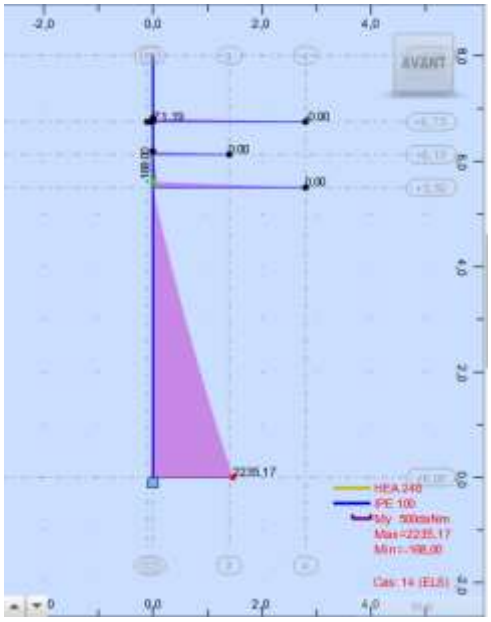


Figure C.7. Moment fléchissant à l'ELS du support HEA 240

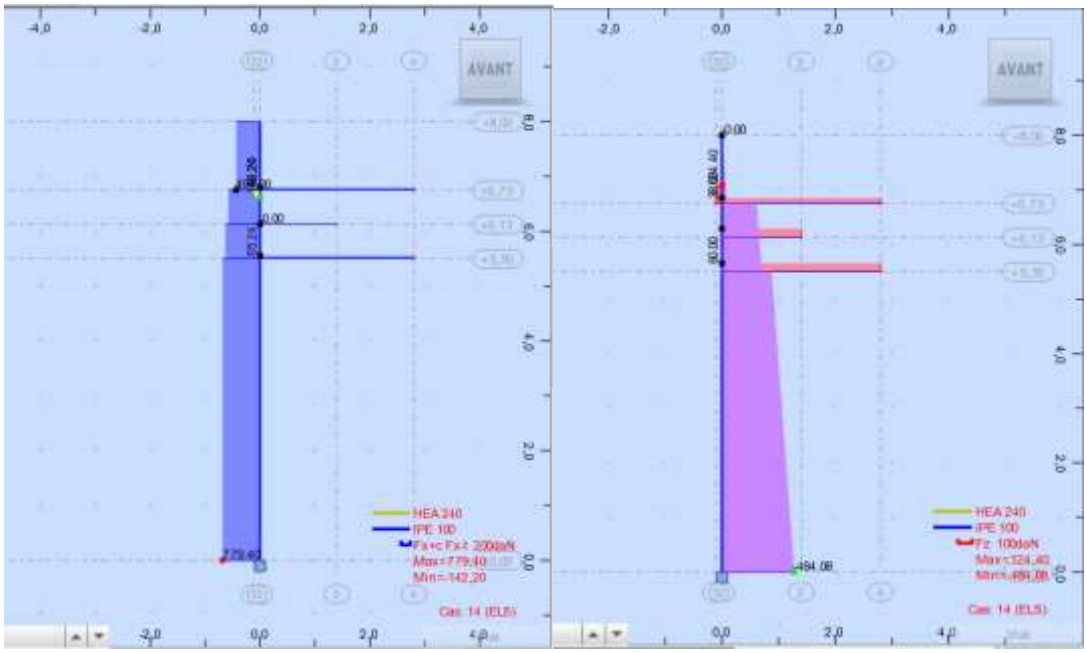


Figure C.8. Effort normal et effort tranchant à l'ELS du support HEA240

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	FZ [daN]	MY [daNm]
1/ 1/ 13 (C)	1052,19	-721,52	3376,26
1/ 2/ 13 (C)	670,95	-0,00	-0,00
2/ 3/ 13 (C)	95,57	81,00	-226,80
2/ 4/ 13 (C)	95,57	81,00	0,00
3/ 5/ 13 (C)	82,07	51,30	-143,64
3/ 6/ 13 (C)	82,07	51,30	-0,00
4/ 7/ 13 (C)	-0,00	81,00	-113,40
4/ 8/ 13 (C)	-0,00	81,00	0,00
5/ 5/ 13 (C)	-213,27	167,94	-18,47
5/ 9/ 13 (C)	-213,27	167,94	0,00

Figure C.9. Tableau des efforts internes à l'ELS du support HEA 240

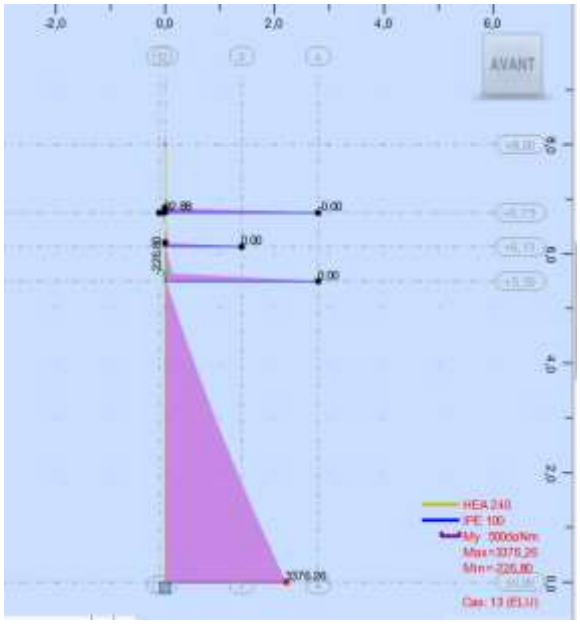


Figure C.10. Moment fléchissant à l'ELU du support HEA 240

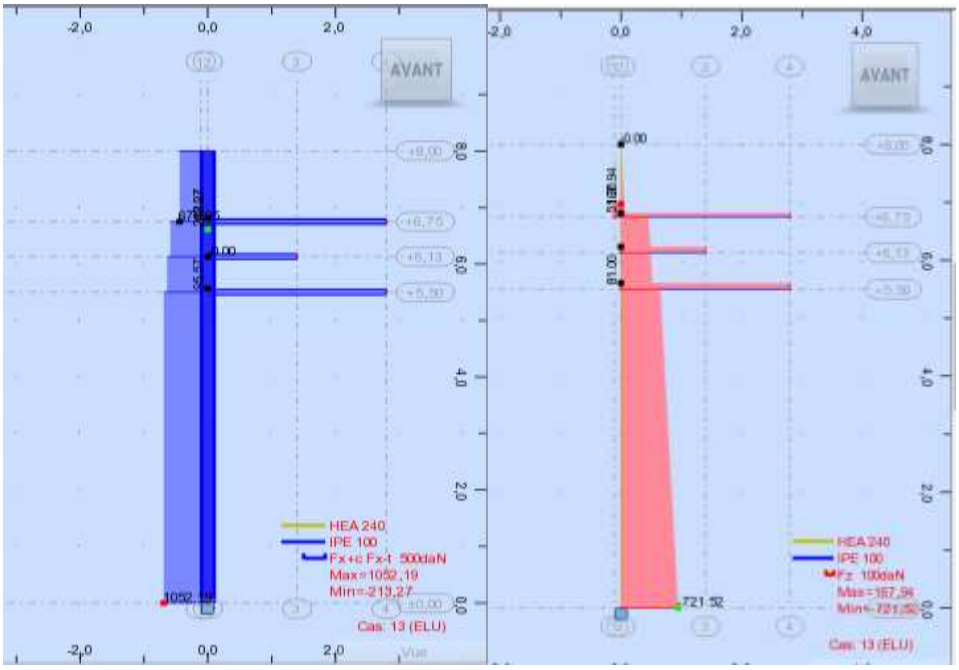


Figure C.11. Effort normal et effort tranchant à l'ELU du support HEA240

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	FZ [daN]	MY [daNm]
1/ 1/ 13 (C)	1052,19	-721,52	3376,26
1/ 2/ 13 (C)	670,95	-0,00	-0,00
2/ 3/ 13 (C)	95,57	81,00	-226,80
2/ 4/ 13 (C)	95,57	81,00	0,00
3/ 5/ 13 (C)	82,07	51,30	-143,64
3/ 6/ 13 (C)	82,07	51,30	-0,00
4/ 7/ 13 (C)	-0,00	81,00	-113,40
4/ 8/ 13 (C)	-0,00	81,00	0,00
5/ 5/ 13 (C)	-213,27	167,94	-18,47
5/ 9/ 13 (C)	-213,27	167,94	0,00

Figure C.12. Tableau des efforts internes à l'ELU du support HEA 240

C.4.2. Portique avec une ouverture de 22m

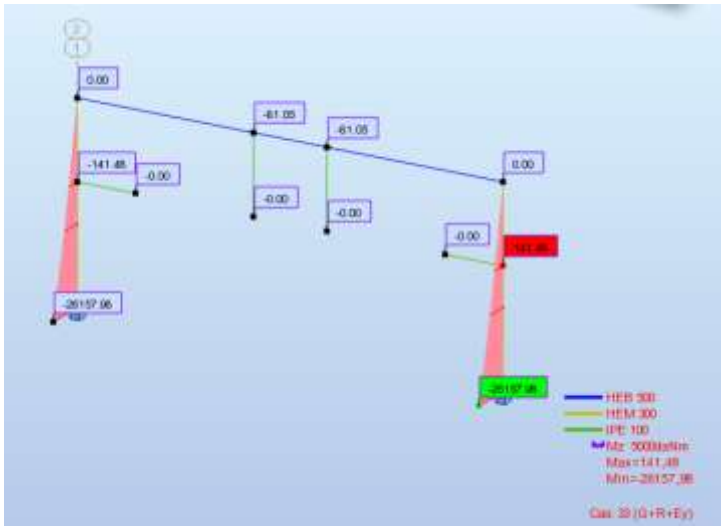


Figure C.13. Moment fléchissant max à l'ELU (M_z : G+R+1.2Ey)

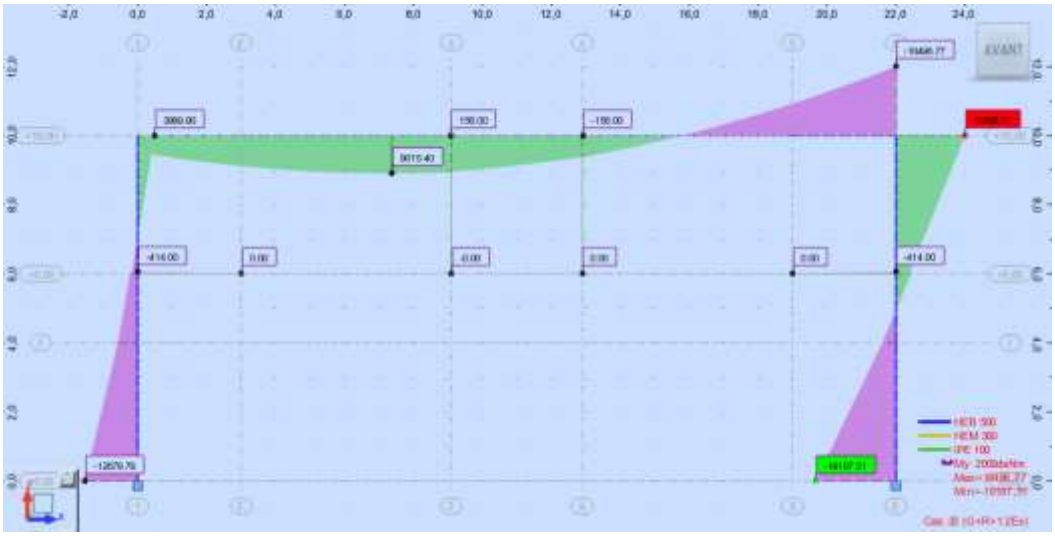


Figure C.14. Moment fléchissant max à l'ELU (M_y : G+R+1.2Ex)

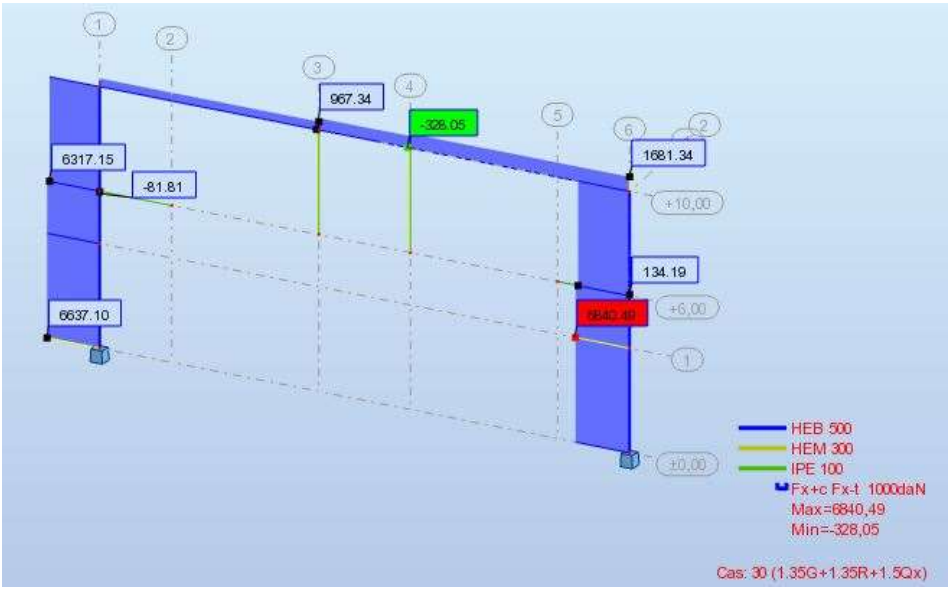


Figure C.15. Effort tranchant max à l'ELU (Fx : 1.35G+1.35R+1.5Qx)

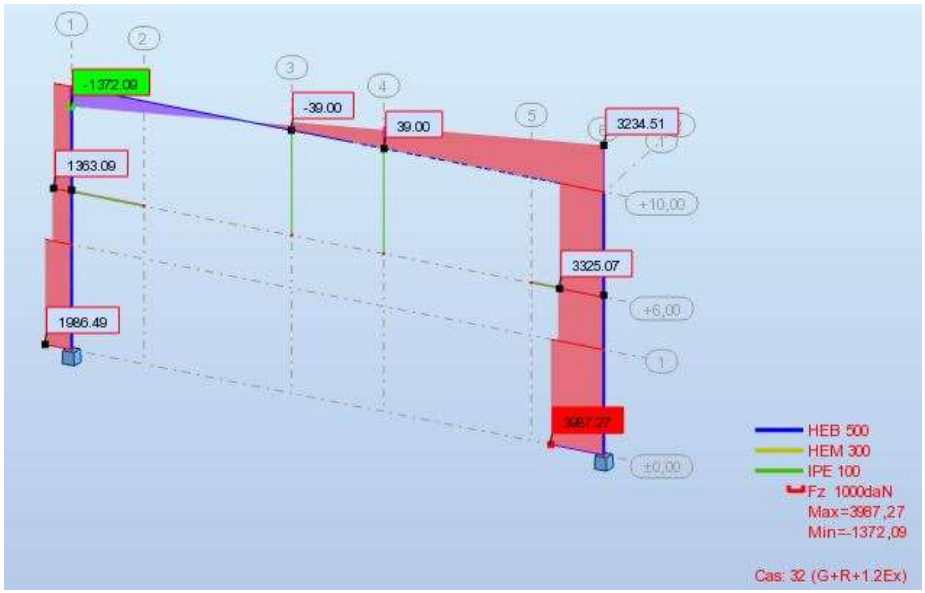


Figure C.16. Effort normal max à l'ELU (Fz : G+R+1.2Ex)

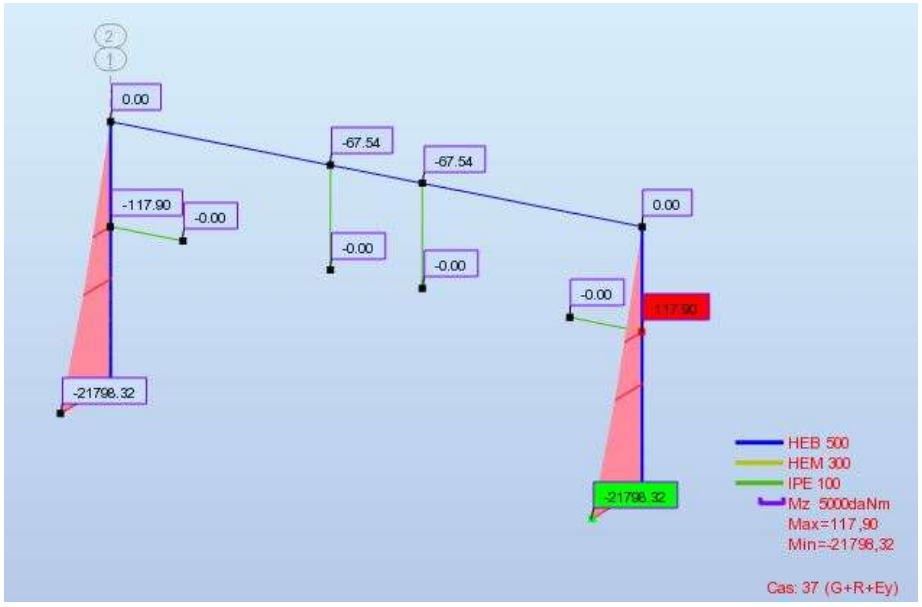


Figure C.17. Moment fléchissant max à l'ELS (M_z : G+R+Ey)

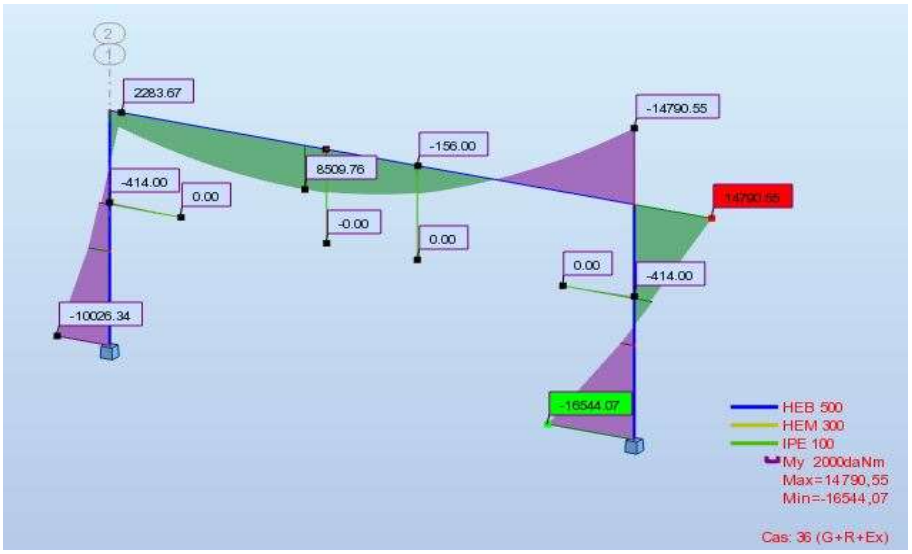


Figure C.18. Moment fléchissant max à l'ELS (M_Y : G+R+Ex)

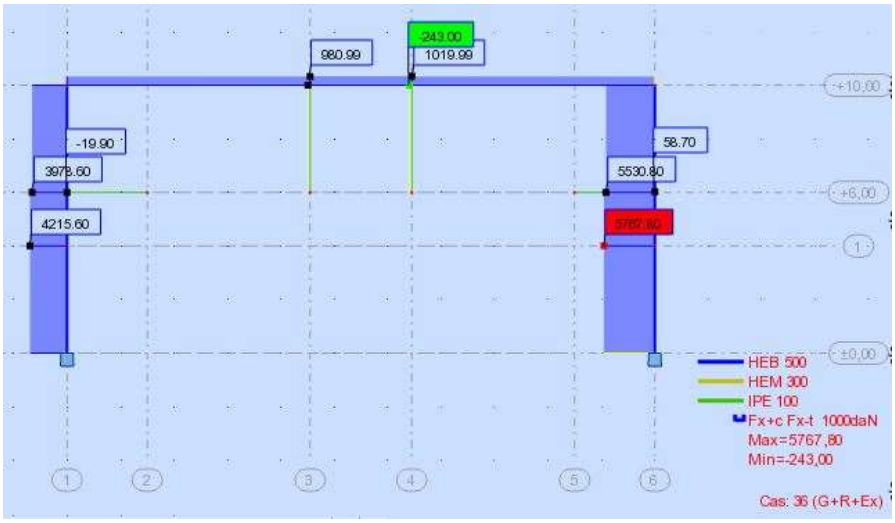


Figure C.19. Effort tranchant max à l'ELS (Fx : G+R+Ex)



Figure C.20. Effort normal max à l'ELS (Fz : G+R+Ex)

30 : 1.35G+1.35R+1.5Qx

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
1/ 1/ 30 (C)	6637,10	0,0	-170,63	0,0	-1021,34	0,0
1/ 2/ 30 (C)	6317,15	0,0	-967,34	0,0	-5895,55	0,0
2/ 3/ 30 (C)	6840,49	0,0	2530,43	0,0	-9820,27	0,0
2/ 4/ 30 (C)	6520,54	0,0	1681,34	0,0	10988,73	0,0
3/ 4/ 30 (C)	1681,34	0,0	3211,15	0,0	-10988,73	0,0
3/ 2/ 30 (C)	967,34	0,0	-3007,76	0,0	-5895,55	0,0
4/ 5/ 30 (C)	-81,81	0,0	186,30	0,0	-558,90	0,0
4/ 6/ 30 (C)	-81,81	0,0	186,30	0,0	0,00	0,0
5/ 7/ 30 (C)	134,19	0,0	186,30	0,0	-558,90	0,0
5/ 8/ 30 (C)	134,19	0,0	186,30	0,0	0,00	0,0
6/ 9/ 30 (C)	-328,05	0,0	-304,35	0,0	1217,40	0,0
6/ 10/ 30 (C)	-328,05	0,0	-304,35	0,0	0,00	0,0
7/ 11/ 30 (C)	-328,05	0,0	-409,65	0,0	1638,60	0,0
7/ 12/ 30 (C)	-328,05	0,0	-409,65	0,0	-0,00	0,0

Figure C.21. Tableau des efforts internes à l'ELU combinaison N°1

31 : 1.35G+1.35R+1.5Qy

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
1/ 1/ 31 (C)	6738,06	-1251,00	-1345,13	-221,71	4375,15	-9471,00
1/ 2/ 31 (C)	6418,11	-861,00	-1324,34	-86,71	-8434,06	1134,00
2/ 3/ 31 (C)	6739,53	-1251,00	1355,93	221,71	-4423,79	-9471,00
2/ 4/ 31 (C)	6419,58	-861,00	1324,34	86,71	8450,22	1134,00
3/ 4/ 31 (C)	1324,34	861,00	3110,19	1134,00	-8450,22	86,71
3/ 2/ 31 (C)	1324,34	-861,00	-3108,72	-1134,00	-8434,06	86,71
4/ 5/ 31 (C)	26,19	-45,00	186,30	0,00	-558,90	-135,00
4/ 6/ 31 (C)	26,19	-45,00	186,30	0,00	0,00	0,00
5/ 7/ 31 (C)	26,19	45,00	186,30	-0,00	-558,90	135,00
5/ 8/ 31 (C)	26,19	45,00	186,30	-0,00	0,00	0,00
6/ 9/ 31 (C)	-328,05	-283,50	52,65	-0,00	-210,60	-1134,00
6/ 10/ 31 (C)	-328,05	-283,50	52,65	-0,00	0,00	0,00
7/ 11/ 31 (C)	-328,05	-283,50	-52,65	0,00	210,60	-1134,00
7/ 12/ 31 (C)	-328,05	-283,50	-52,65	0,00	-0,00	-0,00

Figure C.22. Tableau des efforts internes à l'ELU combinaison N°2

32 : G+R+1.2Ex

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
1/ 1/ 32 (C)	4060,49	0,0	1986,49	0,0	-12679,78	0,0
1/ 2/ 32 (C)	3823,49	0,0	1363,09	0,0	3989,90	0,0
2/ 3/ 32 (C)	5922,91	0,0	3987,27	0,0	-19197,51	0,0
2/ 4/ 32 (C)	5685,91	0,0	3325,07	0,0	16496,77	0,0
3/ 4/ 32 (C)	980,99	0,0	3234,51	0,0	-16496,77	0,0
3/ 2/ 32 (C)	980,99	0,0	-1372,09	0,0	3989,90	0,0
4/ 5/ 32 (C)	-27,76	0,0	138,00	0,0	-414,00	0,0
4/ 6/ 32 (C)	-27,76	0,0	138,00	0,0	0,00	0,0
5/ 7/ 32 (C)	66,56	0,0	138,00	0,0	-414,00	0,0
5/ 8/ 32 (C)	66,56	0,0	138,00	0,0	0,00	0,0
6/ 9/ 32 (C)	-243,00	0,0	39,00	0,0	-156,00	0,0
6/ 10/ 32 (C)	-243,00	0,0	39,00	0,0	0,00	0,0
7/ 11/ 32 (C)	-243,00	0,0	-39,00	0,0	156,00	0,0
7/ 12/ 32 (C)	-243,00	0,0	-39,00	0,0	-0,00	0,0

Figure C.23. Tableau des efforts internes à l'ELU combinaison N°3

33 : G+R+1.2Ey

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
1/ 1/ 33 (C)	4991,16	-2982,88	-996,39	-60,43	3240,85	-26157,98
1/ 2/ 33 (C)	4754,16	-2344,08	-980,99	81,05	-6247,45	0,00
2/ 3/ 33 (C)	4992,24	-2982,88	1004,39	60,43	-3276,88	-26157,98
2/ 4/ 33 (C)	4755,24	-2344,08	980,99	-81,05	6259,42	0,00
3/ 4/ 33 (C)	980,99	-0,00	2303,84	0,00	-6259,42	-81,05
3/ 2/ 33 (C)	980,99	0,00	-2302,76	0,00	-6247,45	-81,05
4/ 5/ 33 (C)	19,40	-47,16	138,00	-0,00	-414,00	-141,48
4/ 6/ 33 (C)	19,40	-47,16	138,00	-0,00	0,00	-0,00
5/ 7/ 33 (C)	19,40	47,16	138,00	-0,00	-414,00	141,48
5/ 8/ 33 (C)	19,40	47,16	138,00	-0,00	0,00	-0,00
6/ 9/ 33 (C)	-243,00	0,00	39,00	-0,00	-156,00	0,00
6/ 10/ 33 (C)	-243,00	0,00	39,00	-0,00	0,00	-0,00
7/ 11/ 33 (C)	-243,00	0,00	-39,00	0,00	156,00	-0,00
7/ 12/ 33 (C)	-243,00	0,00	-39,00	0,00	-0,00	-0,00

Figure C.24. Tableau des efforts internes à l'ELU combinaison N°4

34 : G+R+Qx

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
1/ 1/ 34 (C)	4923,85	0,0	-213,39	0,0	-356,81	0,0
1/ 2/ 34 (C)	4686,85	0,0	-742,99	0,0	-4555,11	0,0
2/ 3/ 34 (C)	5059,55	0,0	1787,39	0,0	-6874,54	0,0
2/ 4/ 34 (C)	4822,55	0,0	1218,99	0,0	7951,76	0,0
3/ 4/ 34 (C)	1218,99	0,0	2371,15	0,0	-7951,76	0,0
3/ 2/ 34 (C)	742,99	0,0	-2235,45	0,0	-4555,11	0,0
4/ 5/ 34 (C)	-52,60	0,0	138,00	0,0	-414,00	0,0
4/ 6/ 34 (C)	-52,60	0,0	138,00	0,0	0,00	0,0
5/ 7/ 34 (C)	91,40	0,0	138,00	0,0	-414,00	0,0
5/ 8/ 34 (C)	91,40	0,0	138,00	0,0	0,00	0,0
6/ 9/ 34 (C)	-243,00	0,0	-199,00	0,0	796,00	0,0
6/ 10/ 34 (C)	-243,00	0,0	-199,00	0,0	0,00	0,0
7/ 11/ 34 (C)	-243,00	0,0	-277,00	0,0	1108,00	0,0
7/ 12/ 34 (C)	-243,00	0,0	-277,00	0,0	-0,00	0,0

Figure C.25. Tableau des efforts internes à l'ELS combinaison N°1

35 : G+R+Qy

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
1/ 1/ 35 (C)	4991,16	-834,00	-996,39	-147,81	3240,85	-6314,00
1/ 2/ 35 (C)	4754,16	-574,00	-980,99	-57,81	-6247,45	756,00
2/ 3/ 35 (C)	4992,24	-834,00	1004,39	147,81	-3276,88	-6314,00
2/ 4/ 35 (C)	4755,24	-574,00	980,99	57,81	6259,42	756,00
3/ 4/ 35 (C)	980,99	574,00	2303,84	756,00	-6259,42	57,81
3/ 2/ 35 (C)	980,99	-574,00	-2302,76	-756,00	-6247,45	57,81
4/ 5/ 35 (C)	19,40	-30,00	138,00	0,00	-414,00	-90,00
4/ 6/ 35 (C)	19,40	-30,00	138,00	0,00	0,00	0,00
5/ 7/ 35 (C)	19,40	30,00	138,00	-0,00	-414,00	90,00
5/ 8/ 35 (C)	19,40	30,00	138,00	-0,00	0,00	0,00
6/ 9/ 35 (C)	-243,00	-189,00	39,00	-0,00	-156,00	-756,00
6/ 10/ 35 (C)	-243,00	-189,00	39,00	-0,00	0,00	0,00
7/ 11/ 35 (C)	-243,00	-189,00	-39,00	0,00	156,00	-756,00
7/ 12/ 35 (C)	-243,00	-189,00	-39,00	0,00	-0,00	-0,00

Figure C.26. Tableau des efforts internes à l'ELS combinaison N°2

36 : G+R+Ex

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
1/ 1/ 36 (C)	4215,60	0,0	1489,34	0,0	-10026,34	0,0
1/ 2/ 36 (C)	3978,60	0,0	972,41	0,0	2283,67	0,0
2/ 3/ 36 (C)	5767,80	0,0	3490,12	0,0	-16544,07	0,0
2/ 4/ 36 (C)	5530,80	0,0	2934,39	0,0	14790,55	0,0
3/ 4/ 36 (C)	980,99	0,0	3079,40	0,0	-14790,55	0,0
3/ 2/ 36 (C)	980,99	0,0	-1527,20	0,0	2283,67	0,0
4/ 5/ 36 (C)	-19,90	0,0	138,00	0,0	-414,00	0,0
4/ 6/ 36 (C)	-19,90	0,0	138,00	0,0	0,00	0,0
5/ 7/ 36 (C)	58,70	0,0	138,00	0,0	-414,00	0,0
5/ 8/ 36 (C)	58,70	0,0	138,00	0,0	0,00	0,0
6/ 9/ 36 (C)	-243,00	0,0	39,00	0,0	-156,00	0,0
6/ 10/ 36 (C)	-243,00	0,0	39,00	0,0	0,00	0,0
7/ 11/ 36 (C)	-243,00	0,0	-39,00	0,0	156,00	0,0
7/ 12/ 36 (C)	-243,00	0,0	-39,00	0,0	-0,00	0,0

Figure C.27. Tableau des efforts internes à l'ELS combinaison N°3

37 : G+R+Ey

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]	MX [daNm]	MY [daNm]	MZ [daNm]
1/ 1/ 37 (C)	4991,16	-2485,73	-996,39	-50,36	3240,85	-21798,32
1/ 2/ 37 (C)	4754,16	-1953,40	-980,99	67,54	-6247,45	0,00
2/ 3/ 37 (C)	4992,24	-2485,73	1004,39	50,36	-3276,88	-21798,32
2/ 4/ 37 (C)	4755,24	-1953,40	980,99	-67,54	6259,42	0,00
3/ 4/ 37 (C)	980,99	-0,00	2303,84	0,00	-6259,42	-67,54
3/ 2/ 37 (C)	980,99	0,00	-2302,76	0,00	-6247,45	-67,54
4/ 5/ 37 (C)	19,40	-39,30	138,00	-0,00	-414,00	-117,90
4/ 6/ 37 (C)	19,40	-39,30	138,00	-0,00	0,00	-0,00
5/ 7/ 37 (C)	19,40	39,30	138,00	-0,00	-414,00	117,90
5/ 8/ 37 (C)	19,40	39,30	138,00	-0,00	0,00	-0,00
6/ 9/ 37 (C)	-243,00	0,00	39,00	-0,00	-156,00	0,00
6/ 10/ 37 (C)	-243,00	0,00	39,00	-0,00	0,00	-0,00
7/ 11/ 37 (C)	-243,00	0,00	-39,00	0,00	156,00	-0,00
7/ 12/ 37 (C)	-243,00	0,00	-39,00	0,00	-0,00	-0,00

Figure C.28. Tableau des efforts internes à l'ELS combinaison N°4

C.5. PARAMÈTRES DE CALCUL SISMIQUE

C.5.1. Coefficient d'accélération de zone

Tableau C.2. Coefficient d'accélération de zone

	Zone		
Groupe	**I**	**II**	**III**
1A	0.12	0.25	0.35
1B	0.10	0.20	0.30
2	0.08	0.15	0.25
3	0.05	0.10	0.15

C.5.2. Coefficient C_T

Tableau C.3. Valeurs du coefficient C_T

Cas N°	Système de contreventement	C_T
1	Portiques autostables en béton armé sans remplissage en maçonnerie	0.075
2	Portiques autostables en acier sans remplissage en maçonnerie	0.085
3	Portiques autostables en béton armé ou en acier avec remplissage en maçonnerie	0.05
4	Contreventement assuré partiellement ou totalement par des voiles en béton armé, des palées triangulées et des murs en maçonnerie	0.05

C.5.3. Période caractéristique T_2

Tableau C.4. Valeurs de la période caractéristique T_2

Site	S1	S2	S3	S4
T_2 **(sec)**	0.30	0.40	0.50	0.70

C.5.4. Pourcentage d'amortissement critique

Tableau C.5. Valeurs de ξ (%)

Remplissage	Portiques		Voiles ou murs
	Béton armé	Acier	Béton armé/ maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	

C.5.5. Coefficient de comportement global de la structure R

Tableau C.6. Valeurs du coefficient de comportement R

Catégorie	Description du système de contreventement	Valeur de R
A	**Béton armé**	
1a	Portiques autostables sans remplissages en maçonnerie rigide	5
1b	Portiques autostables avec remplissages en maçonnerie rigide	3.5
2	Voiles porteurs	3.5
3	Noyau	3.5
4a	Mixte portiques/voiles avec interaction	5
4b	Portiques contreventés par des voiles	4
5	Console verticale à masses réparties	2
6	Pendule inverse	2
B	**Acier**	
7	Portiques autostables ductiles	6
8	Portiques autostables ordinaires	4
9a	Ossature contreventée par palées triangulées en X	4
9b	Ossature contreventée par palées triangulées en V	3
10a	Mixte portiques/palées triangulées en X	5
10b	Mixte portiques/palées triangulées en V	4
11	Portiques en console verticale	2
C	**Maçonnerie**	
12	Maçonnerie porteuse chaînée	2.5

C.6. NOTES DE CALCUL DES SUPPORTS

	CALCUL D'UN SUPPORT	HYPOTHESES DE CALCUL	RESULTAT
Auteur : KOUBA FATMA ZOHRA **Vérifier par l'encadreur :** **LAMINE Rachedi** **30-août-2020**	**CHAPITRE V: Dimensionnement des supports de la caténaire** **Type de support**: Support indépendant avec 01 console Voie N°: **2**	- temp: -10 °C - arasement: 0,4 m - implantation: 2,25 m - hauteur fdc: 5,5 m **- Calcul selon Eurocode 3** - pression vent = 51,33 daN/m² - non haubanné σE = 27,5 daN/mm²	support: **HEA 240** hauteur support: **8 m** contreflèche: **0 cm** **M ⊥ max. (daN.m) = 2878** **FONDATION**

CHARGES PERPENDICULAIRES HORIZONTALES										CHARGES PARALLELES HORIZONTALES							CHARGES VERTICALES		
DESIGNATION	DEVIATIONS DES CABLES							VENT ⊥		ANCRAGE //					VENT //		POIDS & ANCRAGE		
				avec vent ⊥		avec vent //					avec vent ⊥		avec vent //						
	H (m)	d/a ⊥	a (m)	Fr_1 (daN)	Mr_1 (daNm)	Fr_2 (daN)	Mr_2 (daNm)	Fv_1 (daN)	Mv_1 (daNm)	d/a //	Fr_3 (daN)	Mr_3 (daNm)	Fr_4 (daN)	Mr_4 (daNm)	Fv_2 (daN)	Mv_2 (daNm)	d (m)	P (daN)	Mp (daNm)
- Fil de Contact Cu 107	5,50	0,013	63,0	16,0	94	16,0	94	50	292								2,80	60	167
- Porteur Bz 65 pendulé	6,75	0,013	63,0	16,0	114	16,0	114	42	303								2,80	38	107
- Ensemble armement	6,13														30	196	1,40	60	84
- Cable retour traction Al-Ac	6,75	0,001	63,0	1,4	10	1,4	10	71	506								-0,11	62	-7
- Cable retour traction Al-Ac	6,75	0,001	63,0	1,4	10	1,4	10	71	506								-0,11	62	-7
TOTAL :	----------			35	229	35	229	234	1608	--------					30	196	----------	282	344

Support type : **HEA 240**

Caractéristiques:

Section:	7680	mm²
Moment d'inertie ⊥:	7763	cm^4
Moment d'inertie //:	2769	cm^4
Module d'inertie ⊥:	675	cm^3
Module d'inertie //:	231	cm^3
Mom. d'inertie torsio	38	cm^4
Poids du support:	497	daN
Dimension h:	23,0	cm
Dimension b:	24,0	cm
Cx // (support) :	1,44	
Cx ⊥ (support) :	1,77	

charges de vent:

Bend. ⊥ mom. of mast wind:	Mv_3 =	697	daNm
Bend. // mom. of mast wind:	Mv_4 =	545	daNm
Cisaillement ⊥:	T_1 =	174	daN
Cisaillement //:	T_2 =	136	daN
Flèche en tête:		0,91	cm
Flèche sous vent niveau Fdc:		1,67	cm
Flèche admissible:		5,00	cm
Contreflèche:		0	cm

Vérification flèche en tête

Flèche =0,91 cm < 10, 5 cm

Flèche temporaire dûe au vent au niveau du Fil de contact

Flèche dûe au vent au niveau Fdc =1,67 cm < 5,00 cm **Vérification** **OK**

Vérification des tiges : σTige < 2350 daN/cm²

Type de tiges	σTige(daN/cm²) Combinaison type 1 pondéré		σTige(daN/cm²) Combinaison type 2 pondéré	
4 tiges Ø 30	989,57	**OK**	942	**OK**
4 tiges Ø 39	525,20	**OK**	500	**OK**
4 tiges Ø 36	626,65	**OK**	597	**OK**

Vérification de la torsion

Phase finale (ω < 0,1 rad)

ω super. sleeper : **#VALEUR!** rad.
ω infer. sleeper : **#VALEUR!** rad.

Phase travaux (ω < 0,2 rad)

ω super. sleeper (1): 0,026 rad.
ω infer. sleeper (1): -0,029 rad.
ω super. sleeper (2): #VALEUR! rad.
ω infer. sleeper (2): #VALEUR! rad.

CHARGES ET TAUX DE TRAVAIL

σ_{adm} = **15,28 daN/mm²**

	moment ⊥ (daNm)	moment // (daNm)	cisaillement ⊥ (daN)	cisaillement // (daN)	contrainte mom.⊥ perm. (daN/mm²)	contrainte mom.// perm. (daN/mm²)	contrainte mom.⊥ vent (daN/mm²)	contrainte mom.// vent (daN/mm²)	contrainte compr. (daN/mm²)	contrainte total (daN/mm²)		taux de travail support
sans vent	573		35		0,85				0,10	**0,95**	⇨ **OK**	**6,2%**
avec vent ⊥	2878		443		0,85		3,41		0,10	**4,36**		**28,6%**
avec vent //	573	740	35	166	0,85			3,20	0,10	**4,15**		**27,2%**

CHARGES ET TAUX DE TRAVAIL (COMBINATION TYPE 1 PONDERE)

	moment ⊥ (daNm)	moment // (daNm)	cisaillement ⊥ (daNm)	cisaillement // (daNm)	compr.	total		taux de travail support Cdt 1	taux de travail support Cdt 2
sans vent	778		47		0,14	**0,14**	⇨ **OK**	**11,2%**	**5,1%**
avec vent ⊥	4235		659		0,14	**0,14**		**33,6%**	**25,1%**
avec vent //	778	1608	47	374	0,14	**0,14**		**42,7%**	**32,3%**

CHARGES ET TAUX DE TRAVAIL (COMBINATION TYPE 2 PONDERE)

	moment ⊥ (daNm)	moment // (daNm)	cisaillement ⊥ (daNm)	cisaillement // (daNm)	compr.	total		taux de travail support Cdt 1	taux de travail support Cdt 2	TAUX DE TRAVAIL MAXIMUM
sans vent	568		35		0,14	**0,14**	⇨ **OK**	**9,9%**	**3,8%**	**43%**
avec vent ⊥	4025		646		0,14	**0,14**		**32,2%**	**23,9%**	
avec vent //	568	1608	35	374	0,14	**0,14**		**41,3%**	**31,1%**	

	CALCUL D'UN SUPPORT AVEC 02 CONSOLES	HYPOTHESES DE CALCUL	RESULTAT
Auteur : KOUBA FATMA ZOHRA **Vérifier par l'encadreur:** **LAMINE RACHEDI** **30-août-2020**	**CHAPITRE V: Dimensionnement des supports de la caténaire** **Type de support:** Support indépendant avec 02 console Voie N°: **2** SUPPORT N° : **24-07**	- temp: -10 °C - arasement: 0,4 m - implantation: 2,25 m - hauteur fdc: 5,5 m **- Calcul selon Eurocode 3** - pression vent = 51,33 daN/m² - non haubanné σE = 27,5 daN/mm²	support: **HEB 240** hauteur support: **8 m** contreflèche: **3 cm** **M ⊥ max. (daN.m) =** **3665** **FONDATION**

CHARGES PERPENDICULAIRES HORIZONTALES										CHARGES PARALLELES HORIZONTALES							CHARGES VERTICALES		
DESIGNATION	DEVIATIONS DES CABLES							VENT ⊥		ANCRAGE //					VENT //		POIDS & ANCRAGE		
				avec vent ⊥		avec vent //					avec vent ⊥		avec vent //						
	H (m)	d/a ⊥	a (m)	Fr_1 (daN)	Mr_1 (daNm)	Fr_2 (daN)	Mr_2 (daNm)	Fv_1 (daN)	Mv_1 (daNm)	d/a //	Fr_3 (daN)	Mr_3 (daNm)	Fr_4 (daN)	Mr_4 (daNm)	Fv_2 (daN)	Mv_2 (daNm)	d (m)	P (daN)	Mp (daNm)
- Fil de Contact Cu 107	5,50	0,038	34,5	45,7	270	45,7	270	27	160								2,80	33	92
- Porteur Bz 65 pendulé	6,75	0,038	34,5	45,7	327	45,7	327	23	166								2,80	21	58
- Ensemble armement	6,13														30	196	1,40	60	84
- Fil de Contact Cu 107	6,00	0,038	34,5	45,6	292	45,6	292	27	174								2,80	33	92
- Porteur Bz 65 pendulé	7,65	0,038	34,5	45,6	367	45,6	367	23	187								2,80	21	58
- Ensemble armement	6,13														30	196	1,40	60	84
- Cable retour traction Al-Ac	6,75	0,000	34,5	0,7	5	0,7	5	39	277								-0,11	34	-4
- Cable retour traction Al-Ac	6,75	0,000	34,5	0,8	6	0,8	6	39	277								-0,11	34	-4
TOTAL :	----------			184	1266	184	1266	178	1241	--------					60	392	----------	295	461

Support type : **HEB 240**

Caractéristiques:

Section:	10600	mm²
Moment d'inertie ⊥:	11260	cm^4
Moment d'inertie //:	3923	cm^4
Module d'inertie ⊥:	938	cm^3
Module d'inertie //:	327	cm^3
Mom. d'inertie torsio	107	cm^4
Poids du support:	686	daN
Dimension h:	24,0	cm
Dimension b:	24,0	cm
Cx // (support) :	1,44	
Cx ⊥ (support) :	1,77	

charges de vent:

Bend. ⊥ mom. of mast wind:	Mv_3 =	697	daNm
Bend. // mom. of mast wind:	Mv_4 =	568	daNm
Cisaillement ⊥:	T_1 =	174	daN
Cisaillement //:	T_2 =	142	daN
Flèche en tête:		1,66	cm
Flèche sous vent niveau Fdc:		0,96	cm
Flèche admissible:		5,00	cm
Contreflèche:		3	cm

Vérification flèche en tête

Flèche =1,65 cm < 10, 5 cm

Flèche temporaire dûe au vent au niveau du Fil de contact

Flèche dûe au vent au niveau Fdc =0,96 cm < 5,00 cm **Vérification** **OK**

Vérification des tiges : σTige < 2350 daN/cm²

Type de tiges	σTige(daN/cm²) Combinaison type 1 pondéré		σTige(daN/cm²) Combinaison type 2 pondéré	
4 tiges Ø 30	1225,24	**OK**	1088	**OK**
4 tiges Ø 39	650,28	**OK**	578	**OK**
4 tiges Ø 36	775,98	**OK**	689	**OK**

Vérification de la torsion

Phase finale (ω < 0,1 rad)
- ω super. sleeper : **-0,0009** rad.
- ω infer. sleeper : **0,0001** rad.

Phase travaux (ω < 0,2 rad)
- ω super. sleeper (1): -0,019 rad.
- ω infer. sleeper (1): -0,030 rad.
- ω super. sleeper (2): -0,020 rad.
- ω infer. sleeper (2): -0,030 rad.

CHARGES ET TAUX DE TRAVAIL

σ_{adm} = **15,28 daN/mm²**

	moment ⊥ (daNm)	moment // (daNm)	cisaillement ⊥ (daN)	cisaillement // (daN)	contrainte mom.⊥ perm. (daN/mm²)	contrainte mom.// perm. (daN/mm²)	contrainte mom.⊥ vent (daN/mm²)	contrainte mom.// vent (daN/mm²)	contrainte compr. (daN/mm²)	contrainte total (daN/mm²)		taux de travail support
sans vent	1727		184		1,84				0,09	**1,93**	⇨	**12,7%**
avec vent ⊥	3665		537		1,84		2,07		0,09	**4,00**		**26,2%**
avec vent //	1727	960	184	202	1,84			2,94	0,09	**4,87**		**31,9%**

OK

CHARGES ET TAUX DE TRAVAIL (COMBINATION TYPE 1 PONDERE)

	moment ⊥ (daNm)	moment // (daNm)	cisaillement ⊥ (daNm)	cisaillement // (daNm)	compr.	total		taux de travail support Cdt 1	taux de travail support Cdt 2
sans vent	2334		249		0,12	**0,12**	⇨	**16,4%**	**10,2%**
avec vent ⊥	5241		777		0,12	**0,12**		**29,9%**	**22,4%**
avec vent //	2334	1959	249	433	0,12	**0,12**		**43,3%**	**33,7%**

OK

CHARGES ET TAUX DE TRAVAIL (COMBINATION TYPE 2 PONDERE)

	moment ⊥ (daNm)	moment // (daNm)	cisaillement ⊥ (daNm)	cisaillement // (daNm)	compr.	total		taux de travail support Cdt 1	taux de travail support Cdt 2	TAUX DE TRAVAIL MAXIMUM
sans vent	1725		184		0,12	**0,12**	⇨	**13,5%**	**7,7%**	**43%**
avec vent ⊥	4632		713		0,12	**0,12**		**27,0%**	**19,9%**	
avec vent //	1725	1959	184	433	0,12	**0,12**		**40,5%**	**31,2%**	

OK

	CALCUL D'UN SUPPORT D'ANCRAGE	HYPOTHESES DE CALCUL	RESULTAT
Auteur : KOUBA FATMA ZOHRA **Vérifier par l'encadreur:** **LAMINE RACHEDI**	**CHAPITRE V: Dimensionnement des supports de la caténaire** **Type de support:** Support d'ancrage Voie N°: **2** SUPPORT N° : **24-05**	- temp: -10 °C - arasement: 0,4 m - implantation: 2,25 m - hauteur fdc: 5,5 m **- Calcul selon Eurocode 3** - pression vent = 51,33 daN/m² - haubanné σE = 23,5 daN/mm²	support: **HEA 260** hauteur support: **8 m** contreflèche: **3 cm** **M ⊥ max. (daN.m) = 4061** **FONDATION**

CHARGES PERPENDICULAIRES HORIZONTALES										CHARGES PARALLELES HORIZONTALES						CHARGES VERTICALES			
DESIGNATION	DEVIATIONS DES CABLES							VENT ⊥		ANCRAGE //					VENT //		POIDS & ANCRAGE		
				avec vent ⊥		avec vent //					avec vent ⊥		avec vent //						
	H (m)	d/a ⊥	a (m)	Fr_1 (daN)	Mr_1 (daNm)	Fr_2 (daN)	Mr_2 (daNm)	Fv_1 (daN)	Mv_1 (daNm)	d/a //	Fr_3 (daN)	Mr_3 (daNm)	Fr_4 (daN)	Mr_4 (daNm)	Fv_2 (daN)	Mv_2 (daNm)	d (m)	P (daN)	Mp (daNm)
- Fil de Contact Cu 107	5,50	0,025	33,0	29,5	174	29,5	174	26	153								2,80	31	88
- Porteur Bz 65 pendulé	6,75	0,025	33,0	29,5	211	29,5	211	22	159								2,80	20	56
- Ensemble armement	6,13														30	196	1,40	60	84
- Cable retour traction Al-Ac	6,75	0,000	33,0	0,7	5	0,7	5	37	265								-0,11	33	-4
- Cable retour traction Al-Ac	6,75	0,000	33,0	0,7	5	0,7	5	37	265								-0,11	33	-4
- Ancrage Fil de Contact	6,00	0,068	16,5	81,8	524	81,8	524	13	83		#######	######	#VALEUR!	#VALEUR!				1231	
- Ancrage Porteur	7,25	0,068	16,5	81,8	626	81,8	626	11	85		#######	######	#VALEUR!	#VALEUR!				1225	
- 2 contrepoids 240 daN	4,00							30	132						30	132		480	
- 2 Appareils tendeurs	6,25							60	399									80	
TOTAL :	----------			224	1545	224	1545	236	1542	--------	#######	######	#VALEUR!	#VALEUR!	60	328	----------	3192	220

Support type : **HEA 260**

Caractéristiques:

Section:	8680	mm²
Moment d'inertie ⊥:	10460	cm^4
Moment d'inertie //:	3668	cm^4
Module d'inertie ⊥:	836	cm^3
Module d'inertie //:	282	cm^3
Mom. d'inertie torsio	46	cm^4
Poids du support:	562	daN
Dimension h:	25,0	cm
Dimension b:	26,0	cm
Cx // (support) :	1,44	
Cx ⊥ (support) :	1,77	

charges de vent:

Bend. ⊥ mom. of mast wind:	Mv_3 =	755	daNm
Bend. // mom. of mast wind:	Mv_4 =	592	daNm
Cisaillement ⊥:	T_1 =	189	daN
Cisaillement //:	T_2 =	148	daN
Flèche en tête:		1,69	cm
Flèche sous vent niveau Fdc:		1,21	cm
Flèche admissible:		5,00	cm
Contreflèche:		3	cm

Vérification flèche en tête

Flèche =1,69 cm < 10, 5 cm

Flèche temporaire dûe au vent au niveau du Fil de contact

Flèche dûe au vent au niveau Fdc =1,21 cm < 5,00 cm **Vérification** **OK**

Vérification des tiges : σTige < 2350 daN/cm²

Type de tiges	σTige(daN/cm²) Combinaison type 1 pondéré		σTige(daN/cm²) Combinaison type 2 pondéré	
4 tiges Ø 30	1491,39	**OK**	1351	**OK**
4 tiges Ø 39	791,54	**OK**	717	**OK**
4 tiges Ø 36	944,55	**OK**	856	**OK**

Vérification de la torsion

Phase finale (ω < 0,1 rad)

ω super. sleeper : **#VALEUR!** rad.
ω infer. sleeper : **#VALEUR!** rad.

Phase travaux (ω < 0,2 rad)

ω super. sleeper (1): -0,018 rad.
ω infer. sleeper (1): -0,045 rad.
ω super. sleeper (2): #VALEUR! rad.
ω infer. sleeper (2): #VALEUR! rad.

CHARGES ET TAUX DE TRAVAIL

σ_{adm} = **13,06 daN/mm²**

	moment ⊥ (daNm)	moment // (daNm)	cisaillement ⊥ (daN)	cisaillement // (daN)	contrainte mom.⊥ perm. (daN/mm²)	contrainte mom.// perm.	contrainte mom.⊥ vent	contrainte mom.// vent	contrainte compr.	**total**	taux de travail support	
sans vent	1765		224		2,11				0,43	**2,54**	⇨ **OK**	**19,5%**
avec vent ⊥	4061		649		2,11		2,75		0,43	**5,29**		**40,5%**
avec vent //	1765		224		2,11				0,43	**2,54**		**19,5%**

CHARGES ET TAUX DE TRAVAIL (COMBINATION TYPE 1 PONDERE)

	moment ⊥ (daNm)	moment // (daNm)	cisaillement ⊥ (daNm)	cisaillement // (daNm)	compr.	**total**		taux de travail support Cdt 1	taux de travail support Cdt 2
sans vent	2385		302		0,58	**0,58**	⇨ **OK**	**25,2%**	**16,0%**
avec vent ⊥	5829		940		0,58	**0,58**		**47,1%**	**35,1%**
avec vent //	2385		302		0,58	**0,58**		**25,2%**	**16,0%**

CHARGES ET TAUX DE TRAVAIL (COMBINATION TYPE 2 PONDERE)

	moment ⊥ (daNm)	moment // (daNm)	cisaillement ⊥ (daNm)	cisaillement // (daNm)	compr.	**total**		taux de travail support Cdt 1	taux de travail support Cdt 2	**TAUX DE TRAVAIL MAXIMUM**
sans vent	1762		224		0,58	**0,58**	⇨ **OK**	**21,2%**	**12,5%**	**47%**
avec vent ⊥	5207		862		0,58	**0,58**		**43,1%**	**31,7%**	
avec vent //	1762		224		0,58	**0,58**		**21,2%**	**12,5%**	

ANNEXE D

"Dimensionnement des fondations"

ANNEXE D : DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS

D.1. INTRODUCTION

Dans la présente annexe, nous exposerons les détails des calculs pour le dimensionnement des fondations de la caténaire (Chapitre VI).

D.2. GAMME DES FONDATIONS CYLINDRIQUES SELON UIC/ORE

Tableau D.1. Section de fondations

Type de poteau	Diamètre "d" (m)	Profondeur "h" (m)
HEA 220	0.75	2.20
HEB 220	0.75	2.50
HEA 240	0.75	2.50
HEB 240	0.75	2.80
HEA 260	0.75	2.70
HEB 260	0.75	3.00
HEA 280	0.75	2.80
HEB 280	1.00	3.10
HEM 220	1.00	3.00
HEM 240	1.00	3.40
HEM 260	1.00	3.70
HEM 280	1.00	3.90

D.3. FERRAILLAGE AVEC ROBOT EXPERT

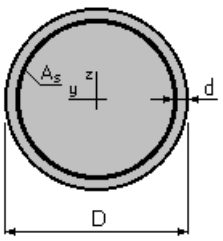
D.3.1. Ferraillage de la fondation pour le support HEM 300 (calcul en Flexion Composée)

1. Hypothèses

Béton : fc28 = 25,0 (MPa) **Acier** : fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration préjudiciable ;
- Prise en compte des dispositions sismiques ;
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99.

2. Section



- D = 100,0 (cm) ;
- d = 5,0 (cm).

3. Efforts appliqués

Cas N^{O}	Type	N (kN)	M_y (kN.m)	M_z (kN.m)
1.	ELS	10.04	32.40	63.14
2.	ELU	13.55	44.23	94.71
3.	ELA	34,90	165,44	217,98

4. Résultats

a. Armatures longitudinales

- Position de l'axe neutre : y $=$ 24,7 cm ;
- Contrainte maximale du béton : σ_{bc} =15,0 MPa ;
- Section d'acier : $A_s = 78.5$ cm^2 ;
- Section minimale : $A_{s_{min}} = 48.5$ cm^2 ;
- Section maximale : $A_{s_{max}} = 392.7$ cm^2

Choix des barres

$A_s = 78.5$ cm^2 $\rightarrow$ $\mathbf{16HA25 = 78.54}$ cm^2

b. Armatures transversales

Données : $V = 50.59\ KN$

- Contrainte tangentielle maximale : $\tau_{max}^{u} = 0.6\ MPa$;
- Contrainte tangentielle limite : $\tau_{lim}^{u} = 2.5\ MPa$;
- Diamètres des armatures transversales : $\emptyset_t = 16mm$;
- Section d'acier : $A_t = 1.6\ cm^2$;
- Espacement : $S_t = 20\ cm$.

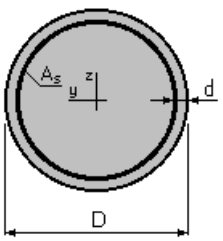
D.3.2. Ferraillage de la fondation pour le support HEA 240 (calcul en Flexion Simple)

1. Hypothèses

Béton : fc28 = 25,0 (MPa) **Acier** : fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration préjudiciable ;
- Prise en compte des dispositions sismiques ;
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99.

2. Section



- D = 80,0 (cm) ;
- d = 5,0 (cm).

3. Efforts appliqués

Cas N^{O}	Type	N (kN)	M_y (kN.m)	V (kN)
1.	ELS	7.79	30.31	4.48
2.	ELU	10.52	44.65	7.24

4. Résultats

a. Armatures longitudinales

- Position de l'axe neutre : y = 20,4 cm ;
- Contrainte maximale du béton : σ_{bc} =15,0 MPa ;
- Section d'acier : $A_s = 30.14$ cm^2 ;
- Section minimale : $A_{s_{min}} = 30.14$ cm^2 ;
- Section maximale : $A_{s_{max}} = 250.7$ cm^2

Choix des barres

$A_s = 30.14$ cm^2 $\rightarrow$ $\boldsymbol{8HA25 = 39.27}$ cm^2

b. Armatures transversales

- Contrainte tangentielle maximale : $\tau_{max}^{u} = 0.6\ MPa$;
- Contrainte tangentielle limite : $\tau_{lim}^{u} = 2.5\ MPa$;
- Diamètres des armatures transversales : $\emptyset_t = 16mm$;
- Section d'acier : $A_t = 1.6\ cm^2$;
- Espacement : $S_t = 20\ cm$.

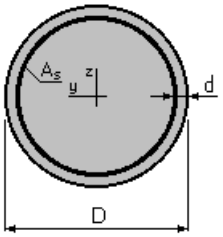
D.3.3. Ferraillage de la fondation pour le support HEB 240 (calcul en Flexion Simple)

1. Hypothèses

Béton : fc28 = 25,0 (MPa) **Acier** : fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration préjudiciable ;
- Prise en compte des dispositions sismiques ;
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99.

2. Section



- D = 80,0 (cm) ;
- d = 5,0 (cm).

3. Efforts appliqués

Cas N^{O}	Type	N (kN)	M_y (kN.m)	V (kN)
1.	ELS	9.82	30.31	4.48
2.	ELU	10.52	38.42	5.81

4. Résultats

a. Armatures longitudinales

- Position de l'axe neutre : y = 20,4 cm ;
- Contrainte maximale du béton : σ_{bc} =15,0 MPa ;
- Section d'acier : $A_s = 50.3$ cm^2 ;
- Section minimale : $A_{s_{min}} = 50.3$ cm^2 ;
- Section maximale : $A_{s_{max}} = 301.6$ cm^2

Choix des barres

$A_s = 50.3$ cm^2 $\rightarrow$ $\mathbf{12HA25 = 58.9}$ cm^2

b. Armatures transversales

- Contrainte tangentielle maximale : $\tau_{max}^{u} = 0.6\ MPa$;
- Contrainte tangentielle limite : $\tau_{lim}^{u} = 2.5\ MPa$;
- Diamètres des armatures transversales : $\emptyset_t = 16mm$;
- Section d'acier : $A_t = 1.6\ cm^2$;
- Espacement : $S_t = 20\ cm$.

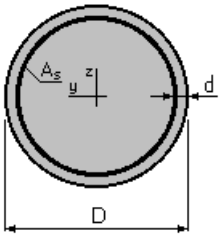
D.3.4. Ferraillage de la fondation pour le support HEA 260 (calcul en Flexion Simple)

1. Hypothèses

Béton : fc28 = 25,0 (MPa) **Acier** : fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration préjudiciable ;
- Prise en compte des dispositions sismiques ;
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99.

2. Section



- D = 80,0 (cm) ;
- d = 5,0 (cm).

3. Efforts appliqués

Cas N^{O}	Type	N (kN)	M_y (kN.m)	V (kN)
1.	ELS	37.55	42.53	6.97
2.	ELU	50.69	61.16	10.12

4. Résultats

a. Armatures longitudinales

- Position de l'axe neutre : y = 20,4 cm ;
- Contrainte maximale du béton : σ_{bc} =15,0 MPa ;
- Section d'acier : $A_s = 50.3\ \text{cm}^2$;
- Section minimale : $A_{s_{min}} = 50.3\ \text{cm}^2$;
- Section maximale : $A_{s_{max}} = 301.6\ \text{cm}^2$

Choix des barres

$A_s = 50.3\ \text{cm}^2 \rightarrow \mathbf{12HA25 = 58.9\ cm^2}$

b. Armatures transversales

- Contrainte tangentielle maximale : $\tau_{max}^{u} = 0.6\ MPa$;
- Contrainte tangentielle limite : $\tau_{lim}^{u} = 2.5\ MPa$;
- Diamètres des armatures transversales : $\emptyset_t = 16mm$;
- Section d'acier : $A_t = 1.6\ cm^2$;
- Espacement : $S_t = 20\ cm$.