

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

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
فرنسيس جاتسون

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

**Etude APD de la nouvelle ligne ferroviaire
BOUGHEZZOUL-M'SILA du PK160+000 au
PK171+000 avec aménagement de la gare de
BIRINE.**

Présenté par :
SAFAR ZITOUN Rym
SELLIDJ Nour El Houda

Encadré par :
M. GALLEZE Boualem
M. HAMADI Kamel

Promotion 20 19 /2020

Remerciements

Avant d'entamer ce mémoire, il est nécessaire d'exprimer notre profonde gratitude et reconnaissance à toute personne ayant contribué à la réalisation de ce travail.

Il nous est agréable d'exprimer notre cordiale gratitude à nos promoteur Mr GALLEZE Boualam, et Mr HAMADI Kamel, pour leurs disponibilités permanentes, pour leurs aides et leurs orientations précieuses, tout au long de ce projet.

On exprime nos profondes reconnaissances et nos vifs remerciements à notre professeur Mr MORSLI Rabah qui n'a épargné aucun effort pour nous conseiller et nous diriger tout au long du stage. Ainsi qu'à tous les enseignants et le personnel de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics.

On tient également à remercier les honorables membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant d'évaluer notre travail.

On tient à remercier chaleureusement Mr KHADRAOUI El Mahdi le directeur du projet et tout le personnel de COSIDER TP pour leur soutien et leur esprit d'équipe, leurs initiatives et leurs informations qui ont été d'un grand intérêt pour l'étude.

En fin, que toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici l'expression de notre gratitude.

Dédicace

I dedicate this humble work to:

My dearest parents, without whom I wouldn't be present here, without whom I wouldn't have reached this point.

To my father, who has always been there for me, held my hand along this journey, encouraged me to reach my goals and never once lost hope in me.

To my mother, who finds the right ways to always cheer me up, who made me fight for what I want and keep on dreaming until I achieve those dreams.

To my sister Djam and my brother Lotfi.

To my grandmother, whose presence lights up my life and universe.

And finally, to my dearest friends, Ines, Ikram and Nesrine, and I would never forget my squad, Houda and Mazigh, thank you for always being there, and keeping my feet on the ground.

This work is dedicated to you.

SAFAR ZITOUN Rym

Dédicace

A la mémoire de mon cher père EL HADJ ABDERREZAK

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Rien au monde ne vaut tes efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de tes vœux tant formulés, le fruit de tes innombrables sacrifices.

J'aurais tant aimé que tu sois présent. Puisse Dieu, le tout puissant, t'accorder sa sainte miséricorde et t'accueillir dans son vaste paradis, et faire en sorte que jamais je ne te déçoive.

Tu resteras gravé dans mon cœur à tout jamais.

A ma très chère mère EL HADJA,

Je ne saurai te remercier assez pour tous tes sacrifices, ton soutien, ton amour, tes prières tout au long de mes études depuis mon enfance.

Aucune dédicace ne saurait exprimer ce que tu mérites pour tous ce que tu as fait pour moi depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur. Merci d'être toujours là pour moi, j'espère que ta bénédiction m'accompagne toujours.

A mes chers et adorables frères Redouane, Karim, Mohamed, Yacine.

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresses et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu vous protège et vous garde.

Une spéciale dédicace à cette personne qui compte énormément pour moi, et pour qui je porte beaucoup d'amour et de respect.

A mes amis de toujours Rym, Hadjer, Mazigh. En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

Nour EL houda SELLIDJ

ملخص

يتمثل هذا المشروع اساسا في دراسة التصميم التفصيلي لمقطع من خط السكة الحديدية المستجد المكهرب الرابط بين المدينة الجديدة بوغزول و المسيلة و هذا بين النقطة الكيلومترية 000+160 و النقطة الكيلومترية 000+171 بطول 11 كم مع تهيئة محطة البيرين

تم تصميم هذا المشروع وفقا للمعايير الموصات بها من طرف الشركة الوطنية للنقل بالسكك الحديدية و الإتحاد الدولي للسكك الحديدية ، و نفذ التصميم بواسطة البرنامج Autodesk civil 3d

Résumé

Le présent projet consiste essentiellement en l'étude d'avant projet détaillé de la nouvelle ligne ferroviaire électrifiée reliant la nouvelle ville de Boughezzoul et M'sila, et ceci entre le PK 160+000 et PK 171+000 avec aménagement de la gare de Birine.

La conception de ce projet a été réalisé selon les recommandations et règlements cités par la Société Nationale de Transport Ferroviaire (SNTF) et l'Union Nationale des Chemins de Fer (UIC). Le tracé de cette ligne a été effectué par le logiciel Autodesk Civil 3D.

Mots clés : voie ferrée, ligne, tracé, gare.

Abstract

This present project essentially consists of the detailed design study of the new electrified railway connecting the new city of Boughezzoul and M'sila, from PK160+000 to 171+000, with the arrangement of the Birine station.

The conception of the specified project was based on the recommendations and standards put by the National Railway Transport Company (SNTF) and the International Union of Railways (UIC). The layout of this railway was conducted by the Autodesk Civil 3D software.

Keywords: Railway, platform, layout, station.

Liste des figures

Figure I.1. Ensemble roue rail en contact (champignon et table de roulement).....	2
Figure I.2. Caractéristiques du contact roue-rail.....	3
Figure I.3. Théorie de Carter.....	5
Figure I.4. Forme de la surface de contact de hertz en statique.....	6
Figure I.5 . Probabilité d’occurrence de RCF et les surfaces de contact en fonction du rayon de courbure.....	8
Figure I.6. Apparition et propagation des fissures par fatigue du rail.....	9
Figure I.7 Vitesse de propagation des fissures du rail selon leur longueur.....	9
Figure I.8. Head checks.....	10
Figure I.9.Squats.....	11
Figure I.10. Comportement asymptotique des matériaux élasto-plastiques.....	11
Figure I.11. Problème de Ponter et al.....	12
Figure I.12. Shakedown Map.....	12
Figure I.13. Modèle de Ekberg -Fatigue index.....	13
Figure I.14. Shakedown excedance et Prospensity.....	14
Figure I.15. Modèle T-Gamma.....	15
Figure I.16. Présentation de Pointner et Donawitz.....	15
Figure II.1. Les grands axes du plan de modernisation du rail en Algérie.....	17
Figure II.2. Photo représentant le relief.....	19
Figure II.3. Carte de zonage sismique d’Algérie (RPOA 2008).....	20
Figure III.1. Constituants de la superstructure de voie ferrée.....	23
Figure III.2. Rail Vignole.....	24
Figure III.3. Traverse en bois.....	25
Figure III.4. Traverse métallique.....	26
Figure III.5. Traverse monobloc.....	26
Figure III.6. Traverse bi-bloc.....	27
Figure III.7. Constitution d’un branchement simple.....	29
Figure IV.1. Force appliquée par le train en courbe et le dévers correspondant.....	32
Figure IV.2. Schéma de raccordement de dévers.....	34
Figure IV.3. Eléments de la clothoïde.....	37
Figure IV.4. Longueur des rampes en fonction de l’inclinaison.....	41
Figure IV.5. Eléments de raccordement de profil en long.....	43
Figure IV.6. Constituants du profil en travers.....	45
Figure V.1. Extrait de la carte géologique de l’Algérie au 1/500000 avec tracé de la ligne de chemin de fer M’sila-Boughezzoul.....	46
Figure VI.1. dessin du profil en travers type.....	59
Figure VI.2. les différentes épaisseurs de la voie.....	60
Figure VII.1. Carte de situation de la région d’étude.....	61
Figure VII.2. Fossé trapézoïdale.....	73
Figure VIII.1. Vue en 3D de la façade principale la gare voyageurs de Birine.....	77
Figure VIII.2. Vue en 3D de l’élément d’appel.....	79
Figure VIII.3. Vue en 3D de la gare côté quai.....	79
Figure VIII.4. La partie centrale du quai.....	80
Figure VIII.5. Abris de quai.....	80
Figure VIII.6. Schéma représentatif de la longueur utile d’une voie.....	82
Figure IX.1. Schéma explicatif du principe de cantonnement.....	90
Figure IX.2. Schéma explicatif du block manuel.....	91
Figure IX.3. Schéma explicatif du block automatique.....	91

Liste des tableaux

Tableau I.1. Principales théories du contact roue-rail.....	3
Tableau I.2. Les dimensions habituelles des différents matériels roulants.....	7
Tableau II.1. Tableau climatique de la région d'études.....	19
Tableau II.2. Coefficient d'accélération A.....	21
Tableau II.3. Contraintes de tracé en plan.....	21
Tableau II.4. Contraintes du profil en long.....	21
Tableau IV.1. Valeurs de l'insuffisance du dévers selon la fiche UIC 723-R.....	33
Tableau IV.2. Valeurs de l'excès de dévers selon la fiche UIC 723-R.....	33
Tableau IV.3. Valeurs limites de variation de dévers dans une courbe de transition.....	35
Tableau IV.4. Valeurs limites de la variation de dévers par rapport au temps.....	35
Tableau IV.5. Valeurs limites de la variation d'insuffisance de dévers par rapport au temps.....	35
Tableau IV.6. Valeurs normales des caractéristiques des différentes courbes.....	37
Tableau IV.7. Coordonnées des points caractéristiques de la clothoïde.....	38
Tableau IV.8. Valeurs des rayons verticaux selon référentiel SNTF.....	41
Tableau IV.9 : longueurs de déclivité minimales selon le référentiel SNTF.....	42
Tableau IV.10. Coordonnées des points caractéristiques du profil en long.....	43
Tableau V.1. Résultats des puits de reconnaissance.....	47
Tableau V.2. Résultats des sondages carottés.....	48
Tableau V.3. Compacité des sables.....	49
Tableau V.4. Aperçu des résultats des essais physiques et mécaniques sur les matériaux rocheux.....	53
Tableau V.5. Aperçu des résultats des essais physiques et mécaniques sur les matériaux rocheux.....	53
Tableau V.6. Classes de portance de la région.....	54
Tableau VI.1. Taux de réutilisation des matériaux déblayés.....	55
Tableau VI.2. Localisation des gites d'emprunt et la possibilité de leur réutilisation.....	56
Tableau VI.3 . Épaisseur et qualité envisagé pour la couche de forme.....	57
Tableau VI.4 . Caractéristiques de la voie.....	59
Tableau VI.5. Quantités des matériaux.....	60
Tableau VII.1. Températures moyennes de la région.....	61
Tableau VII.2. Précipitations mensuelles et annuelles.....	62
Tableau VII.3. Précipitation journalière.....	62
Tableau VII.4. Coefficient de ruissèlement (SETRA).....	64
Tableau VII.5. Caractéristiques des bassins versants.....	64
Tableau VII.6. Caractéristiques du bassin versant 1.....	66
Tableau VII.7. Résultats des débits d'apport.....	67
Tableau VII.8. Caractéristiques du bassin versant 03.....	69
Tableau VII.9. Itération des longueurs.....	69
Tableau VII.10. Conditions d'auto curage du dalot (BV 03).....	70
Tableau VII.11. Caractéristiques des dalots du projet.....	70
Tableau VII.12. Caractéristique de la buse du bassin versant 05.....	71
Tableau VII.13. Conditions d'auto curage de la buse (BV5).....	72
Tableau VII.14. Caractéristiques des buses du projet.....	72
Tableau VII.15. Calcul des débits d'apport des talus.....	73
Tableau VII.16. Caractéristiques du fossé.....	73
Tableau VIII.1. Longueur utile des lignes de la gare voyageurs.....	82
Tableau VIII.2. Appareils de changement de voie de la gare voyageurs.....	82
Tableau 0.1. Devis estimatif et quantitatif.....	93

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	12
CHAPITRE I : LA FATIGUE DUE AU CONTACT ROUE-RAIL DANS LA VOIE FERREE.	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Problématique	2
I.3. Le contact roue-rail	2
I.3.1. Forces intervenantes entre roue et rail	3
I.4. Caractéristiques du contact roue-rail	3
I.5 Théories de contact roue-rail	3
I.5.1. Théorie de Hertz	4
I.5.2. Théorie de Carter.....	4
I.5.3Théorie de Kalker	5
I.6. Modélisation mathématique du contact selon la théorie de Hertz	6
I.7. La fatigue du rail.....	7
I.8. Fatigue du contact roulant (Rolling Contact Fatigue).....	7
I.8.1. Mécanisme du RCF.....	8
I.8.2. Défauts dus à la fatigue du contact roulant	9
I.8.3. Modèles existants de prédiction de RCF du rail	11
I.9. Conclusion	15
CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET.	
II.1. Introduction	17
II.2. Description globale du projet	17
II.3. Localisation du projet	18
II.4. Objectifs du projet	18
II.5. Présentation de la zone d'études	18
II.5.1. Démographie.....	18
II.5.2. Relief	18
II.5.3. Climat	19
II.5.4. Sismicité.....	20
II.6. Données du projet.....	21
II.6.1. Vitesse de base	21
II.6.2. Contraintes de tracé en plan.....	21
II.6.3. Contraintes du profil en long	21
II.6.4. Superstructure et infrastructure de la voie.....	21

II.7. Conclusion.....	22
CHAPITRE III : LES CONSTITUANTS DE LA VOIE.	
III.1. Introduction.....	23
III.2. Les catégories de voies.....	23
III.3. Le rail.....	23
III.3.1. Le rail Vignole.....	24
III.3.2. Long Rail Soudé (LRS).....	24
III.4. Les traverses.....	25
III.5. Les attaches	27
III.5.1. Attaches rigides pour rails Vignole	27
III.5.2. Attaches élastiques pour rails Vignole	27
III.5.3. Les attaches pour rails à simple ou double champignon	28
III.6. Les semelles	28
III.7. Le ballast.....	28
III.8. Les appareils de voie.....	28
III.9. Conclusion	29
CHAPITRE IV : ETUDE GEOMETRIQUE.	
IV.1. Introduction.....	31
IV.2. Tracé en plan.....	31
IV.2.1. Conditions et règles à respecter dans le tracé en plan	31
IV.2.2. Eléments de tracé en plan.....	31
IV.2.3. Conditions de raccordement	32
IV.2.4. Paramètres de conception de la voie.....	32
IV.2.5. Application au projet.....	36
IV.2.6. Calcul de l'axe	37
IV.3. Profil en long	40
IV.3.1. Constituants du profil en long.....	41
IV.3.2. Règles à respecter dans le tracé du profil en long	41
IV.3.3. Déclivités maximales	41
IV.3.4. Rayons minimaux de raccordement en profil en long	42
IV.3.5. Longueurs minimales des éléments de profil en long	42
IV.3.6. Coordination entre le tracé en plan et le profil en long	43
IV.3.7. Calcul des éléments de profil en long	43
IV.4. Profil en travers.....	45
IV.4. Eléments constituants du profil en travers	45
IV.5. Conclusion	46

CHAPITRE V : ETUDE GEOTECHNIQUE.

V.1. Introduction	47
V.2. Géologie du couloir d'étude	47
V.3. Puits de reconnaissance	48
V.4. Sondages carottés	49
V.4.1. Interprétation des résultats	50
V.5. Essais in-situ	50
V.5.1. Essais SPT (Standard penetration test)	50
V.6. Essais au laboratoire	51
V.6.1. Echantillons remaniés	51
V.6.2. Echantillons intacts	51
V.7. Résultats des essais	52
V.8. Conclusion	55

CHAPITRE VI : TERRASSEMENT ET STRUCTURE D'ASSISE.

VI.1. Introduction	56
VI.2. Terrassements	56
VI.2.1. Déblais	56
VI.2.2. Remblais	57
VI.3. Structure d'assise	57
VI.3.1. Le ballast	57
VI.3.2. La sous-couche	57
VI.3.3. Plateforme	58
VI.3.4. Dimensionnement de la couche d'assise 'ballast + sous-couche'	58
VI.3.5. Calcul des épaisseurs de la superstructure et infrastructure	60
VI.4. Cubatures	61
VI.5. Conclusion	61

CHAPITRE VII : ETUDE HYDRAULIQUE ET ASSAINISSEMENT.

VII.1. Introduction	62
VII.2. Présentation hydrologique de la zone	62
VII.2.1. Caractéristiques du climat	62
VII.2.2. Pluviométrie	63
VII.2.3. Caractéristiques des bassins versants	64
VII.3. Estimation des débits de crue	66
VII.3.1. Intensité de la pluie (I)	66
VII.3.2. Calcul des crues	67
VII.4. Dimensionnement des ouvrages hydrauliques	69

VII.4.1. Dimensionnement des dalots	69
VII.4.2. Dimensionnement des buses	71
VII.4.3. Dimensionnement des fossés	73
VII.5. Conclusion	75
CHAPITRE VIII : AMENAGEMENT DES GARES.	
VIII.1. Introduction.....	76
VIII.2. Les différents types de gares	76
VIII.3. Installations d'une gare voyageurs	77
VIII.4. La gare voyageurs de Birine	77
VIII.4.1. Aménagement intérieur.....	78
VIII.4.2. Aménagement extérieur	79
VIII.4.3. Exploitation de la gare voyageurs.....	81
VIII.4.4. Configuration fonctionnelle	82
VIII.5. Conclusion	84
CHAPITRE IX : LA SIGNALISATION FERROVIAIRE.	
IX.1. Introduction.....	85
IX.2. Rôle des installations de signalisation	85
IX.3. Les signaux	85
IX.4. La signalisation au sol.....	86
IX.4.1. Signaux de protection	86
IX.4.2. Signaux de cantonnement.....	86
IX.4.3. Signaux d'annonce d'arrêt.....	87
IX.4.4. Signaux d'indication de marche	88
IX.4.5. Signaux de limitation de vitesse	88
IX.4.6. Signaux indicateurs de direction	89
IX.4.7. Signaux caractéristiques de prescriptions particulières	89
IX.4.8. Signalisation de sortie de certains faisceaux ou groupes de voies convergentes.....	90
IX.5. La signalisation de cabine	90
IX.6. Les systèmes d'espacement des trains	90
IX.6.1. Les différents modes de cantonnement	91
IX.7. Conclusion	92
CHAPITRE X : DEVIS ESTIMATIF ET QUANTITATIF.	
CONCLUSION GENERALE.	

Liste des symboles et abréviations :

Symbole	Désignation	Unité
V_a	Vitesse d'avance	m/s
V_r	Vitesse linéaire	m/s
v_x	Glissement longitudinal	-
T_x	Valeur limite de l'effort tangentiel.	N
RCF	Rolling Contact Fatigue (fatigue du contact roualnt)	-
σ_t	Contrainte tangentielle.	N/mm ²
V_{slip}	Vitesse de glissement.	m/s
A	Coefficient d'accélération	g
APD	Avant-projet détaillé	-
RPOA	Règlement Parasismique Algérien	-
LRS	Long Rail Soudé	-
TJS	Les Traversées Jonction Simples	-
TJD	Les Traversées Jonction Doubles	-
R	Rayon de raccordement circulaire	m
R_{min}	Rayon minimal de raccordement circulaire	m
L_{min}	Longueur minimale de l'alignement droit	m
d_{th}	Dévers théorique	mm
d_p	Dévers pratique	mm
I	Insuffisance du dévers	mm
I_{max}	Insuffisance du dévers maximale	mm
E	Excès de dévers	mm
E_{max}	Excès de dévers maximal	mm
dd/dL	Variation du dévers en fonction de sa longueur	mm/m
dd/dt	Variation du dévers en fonction du temps	mm/t
dI/dt	Variation de l'insuffisance en fonction du temps	mm/t
C	Coefficient de dévers	-
L	Longueur de la courbe de transition	m
A	Paramètre de clothoïde	m
R_{vmin}	Rayon vertical minimal	m
V_R	Vitesse des trains rapides (voyageurs)	km/h
V_m	Vitesse des trains lents (marchandises)	km/h
WL	Limite de liquidité	%
W_p	Limite de plasticité	%
W	Teneur en eau naturelle	%
VBS	Valeur de bleu de méthylène	g/100g
C_u	Cohésion effective	Bars
Φ	Angle de frottement effective	Degrés
R_c	Résistance à la compression simple	Bars
Q_{max}	Débit de pointe	m ³ /s
Q_a	Débit d'apport	m ³ /s
T_C	Temps de concentration	heure

I	Pente du lit	m/m
S_m	Surface Mouillée	m ²
A	Superficie du bassin versant	Ha
C	Coefficient de ruissellement du bassin versant	-
R_h	Rayon hydraulique	M
K_s	Coefficient de rugosité	-
J	Pente longitudinale de l'ouvrage	m/m
D_{th}	Diamètre théorique de la buse	m
L_U	Longueur utile d'une voie	m
BM	Le bloque manuel	-
BAL	Le bloque automatique lumineux	-
BAPR	Le block automatique à perméabilité restreinte	-
H.T	Hors Taxes	DA
T.V.A	Taxe sur la Valeur Ajoutée	DA
T.T.C	Toutes Taxes Comprises	DA

INTRODUCTION GENERALE.

Introduction générale

Le transport joue un rôle essentiel dans le développement économique et commercial des pays et, partant, dans le bien-être de leur population.

Par-delà et à travers sa tâche principale consistant à assurer le déplacement des personnes et la circulation des biens, le transport a un impact considérable sur la vie de nombreuses personnes en contribuant à la création d'emplois et à rendre plus accessibles l'infrastructure et les services sociaux.

Le transport ferroviaire est parmi les moyens de transports les plus utilisés pour transporter les voyageurs et les marchandises, pour ses avantages remarquables en comparaison avec les autres moyens courants.

Le secteur ferroviaire en Algérie a fait son apparition pour la première fois à la fin du 19^e siècle et a reconnu des mutations et développement pour arriver à nos jours. L'état algérien a lancé plusieurs projets pour pouvoir exploiter ce moyen dans le transfert de marchandise, transport de voyageurs et désenclavement des régions éloignées ainsi que les zones d'ombre du pays.

Parmi les projets les plus importants lancés est la ligne ferroviaire mixte à voie unique « M'sila – Boughezzoul », qui a pour but de relier la nouvelle ville de Boughezzoul aux régions adjacentes.

Le travail présenté dans le cadre de cette thèse consiste en la conception et l'étude d'avant-projet détaillé du tronçon allant du PK160+000 au PK171+000 de cette ligne avec aménagement de la gare des voyageurs de Birine. Après une brève introduction générale, une recherche bibliographique sur la fatigue due au contact roue-rail est présentée dans le premier chapitre suivi par une présentation du projet et de la zone d'études dans le deuxième chapitre.

Les différents constituants de la voie ferrée seront détaillés dans le troisième chapitre. Ensuite, l'étude géométrique en question est détaillée dans le chapitre quatre.

Les spécificités géologiques et géotechniques des zones traversées par le tracé de la ligne ferroviaire sont présentées dans le cinquième chapitre.

Le chapitre six présente les détails sur les différents mouvements de terres et la structure d'assise de notre voie.

L'assainissement et l'étude des bassins versants de la région ont été étudié et spécifiés dans le chapitre sept.

Le chapitre huit contient l'aménagement de la gare voyageurs de Birine.

Dans le chapitre suivant, la signalisation ferroviaire est définie.

Enfin, nous avons fait une estimation des coûts du projet dans le dernier chapitre, finalisant ce travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I : LA FATIGUE DUE AU CONTACT ROUE-RAIL DANS LA VOIE FERREE.

I.1. Introduction

Le phénomène d'endommagement des roues monoblocs et l'usure des rails des voies ferrées sont parmi les préoccupations majeures des responsables du secteur du chemin de fer.

Les véhicules circulant sur des pneumatiques (camions, autobus, etc.) ont une surface de contact entre la chaussée et le pneu qui fait entre 25.4 mm et 177.8 mm de diamètre. Cette grande surface de contact implique forcément une grande friction. Cette friction, qu'on appelle aussi l'adhérence, et qui permet au véhicule de combattre la force d'inertie lors d'accéléérations et de freinage. Les wagons et locomotives ont une surface de contact entre la roue et le rail qui ne dépasse guère 6.35 mm. Cette si petite surface, pour un poids 100 fois plus important qu'une auto, ne donne pas beaucoup d'adhésion. Par conséquent, il y a très peu de perte de friction entre la roue et le rail. C'est ce qui permet à un train de transporter des chargements énormes. Mais c'est aussi ce qui rend sa conduite plus difficile, avec des accélérations très lentes, et des freinages très longs.

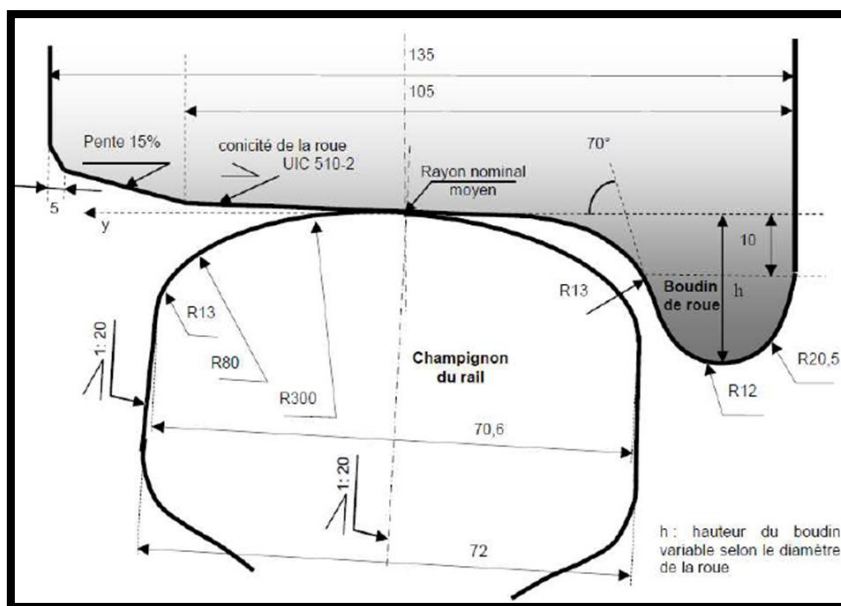


Figure I.1. Ensemble roue rail en contact (champion et table de roulement).

I.2. Problématique

La résolution du problème du contact normal entre deux corps consiste à déterminer l'aire de contact formée ainsi que la pression dans cette aire. Plusieurs méthodes existent et permettent aujourd'hui une telle résolution comme la méthode par éléments de frontière basée sur la solution de Boussinesq, ou encore la méthode des éléments finis. Malgré l'évolution croissante des algorithmes de résolution qui ne cesse de réduire le coût de calcul, l'implémentation de ces méthodes numériques dans les codes de dynamique ferroviaire n'est toujours pas possible pour répondre aux besoins des ingénieurs, car leur temps de calcul reste très élevé en comparaison avec les méthodes analytiques dérivées de la théorie Hertzienne.

I.3. Le contact roue-rail

L'interaction entre la roue et le rail est toujours très difficile à approcher. Il existe un grand nombre d'études dans la littérature sur ce problème, mais il n'y a toujours pas d'approche complète.

La dynamique locale du contact roue-rail est expérimentalement inaccessible. Les moyens expérimentaux actuels ne peuvent que tenter de reconstituer la dynamique locale de contact en fonction des informations physiquement accessibles.

I.3.1. Forces intervenantes entre roue et rail

- les forces en présence : normale, transversales transmises entre les solides.
- la cinématique : statique, roulement, roulement avec glissement et rotation.

I.4. Caractéristiques du contact roue-rail

Avec une charge sur la roue assez élevée, entre 40 kN (Tramway) et 130 kN (TGV ou Fret), nous pouvons avoir une très haute pression (1000-2000 Mpa) dans la zone de contact roue – rail. En fonction de la vitesse de roulement du train et de l'état des surfaces de contact, les efforts tangentiels dans la zone de contact peuvent être plus ou moins importants. La haute pression et les contraintes tangentielles sont des causes directes de différents types de dégradation du rail et de la roue (usure, fissuration, rupture, ...).

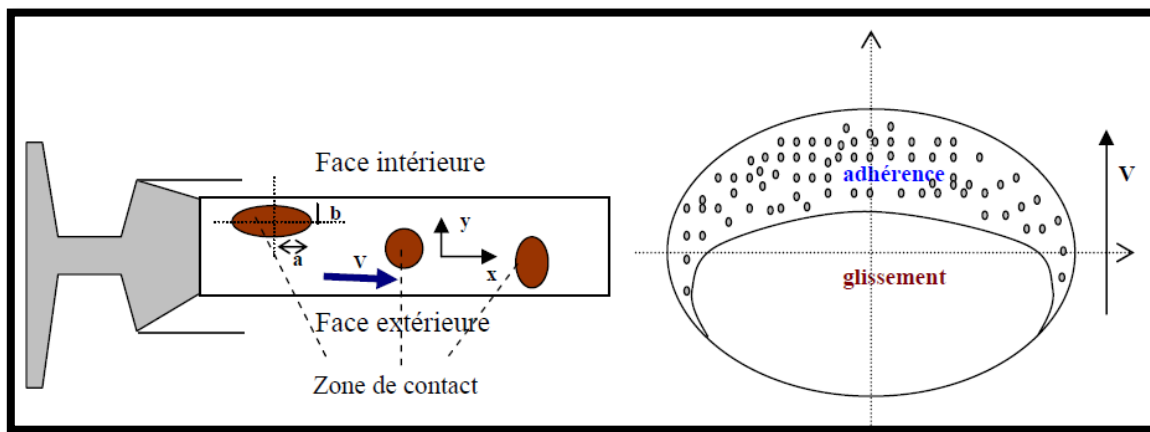


Figure I.2. Caractéristiques du contact roue-rail.

Dans la zone de contact roue – rail, nous trouvons toujours deux parties : une partie d'adhérence (les deux solides sont collés) et une partie de glissement (il y a un mouvement relatif entre deux solides en contact).

I.5 Théories de contact roue-rail

Les théories du contact ont été établies dans un contexte volontairement simplifié.

Différents chercheurs se sont intéressés au contact roue-rail pour en déterminer la forme et la surface, en fonction de la nature des matériaux et des forces en présence et tenter d'estimer les limites de l'adhérence et ses valeurs en fonction du glissement.

Le tableau qui suit résume le contexte des principaux travaux sur ce sujet :

Tableau I.1. Principales théories du contact roue-rail.

Caractéristiques des principales théories du contact			
Auteur-année	Forces	Cinématique	Résolution
Hertz 1881	Normales	Statique	Analytique
Carter 1926	Normales et tangentielles	Roulement	
Kalker 1967-1993		Roulement , glissement et rotation	Numérique

I.5.1. Théorie de Hertz

En 1881, Hertz a développé une méthode pour étudier la forme de la zone de contact ainsi que la distribution des pressions sur la surface de contact entre deux solides élastiques. Cette théorie a été utilisée à de nombreuses reprises pour calculer les efforts normaux dans le contact roue – rail.

La théorie de Hertz répond à ces besoins à partir des hypothèses suivantes :

- Les dimensions de la zone de contact sont petites par rapport aux dimensions des corps.
- La limite élastique des matériaux n'est pas dépassée
- Les corps en contact peuvent être assimilés à des massifs semi-infinis, parfaitement élastiques, homogènes et isotropes.
- Les surfaces peuvent être assimilées géométriquement à des surfaces elliptiques du second ordre au voisinage du point de contact et les rayons de courbures sont connus.
- Il n'y a pas de frottement à l'interface et par conséquent les réactions mutuelles se réduisent à des efforts normaux.

Dans le cas du ferroviaire, si le contact entre la roue et le rail se passe sur la table de roulement du rail, les dimensions du contact (a et b sont souvent inférieurs à 10 mm) restent négligeables devant les rayons de courbure de la roue et du rail (< 300 mm) et les conditions de Hertz sont souvent vérifiées.

Cependant, l'inscription d'un train dans une courbe tend souvent à localiser le contact roue – rail au niveau du congé de raccordement entre la table de roulement et la joue active du rail, dont le rayon de courbure est inférieur à 20 mm. Les conditions de Hertz ne sont alors plus vérifiées et la théorie de Hertz n'est plus valable.

I.5.2. Théorie de Carter

La première solution « classique » au problème du contact roulant avec frottement a été déterminée analytiquement par Carter en 1926. Ce dernier modélise le roulement d'une roue sur un rail par celui d'un cylindre sur un massif plan semi-infini permettant ainsi de résoudre ce contact sous la forme d'un contact linéique en deux dimensions dans le plan (X, Z).

Carter montre tout d'abord que la différence entre la vitesse d'avance (V_a) et la vitesse linéaire (V_r) de la roue est non nulle tant que des conditions d'accélération ou de décélération sont appliquées à cette dernière : c'est le glissement longitudinal v_x . Cette différence croît avec le couple moteur tant que la valeur limite de l'effort tangentiel (T_x) dans le contact reste inférieure à sa limite en accord avec la loi de Coulomb.

D'autre part, il démontre, tant expérimentalement que théoriquement, la coexistence de zones d'adhérence et de glissement dans le contact, dont la répartition varie en fonction du glissement longitudinal v_x . Expérimentalement, cette coexistence est établie en photoélasticité en considérant l'inertie des corps négligeable, les surfaces lisses et non contaminées et pour de très faibles vitesses d'avance. Théoriquement, cette coexistence est obtenue par la superposition des contraintes tangentielles $q_1(x)$ et $q_2(x^*)$, établies respectivement dans les cas de non glissement et de glissement complet.

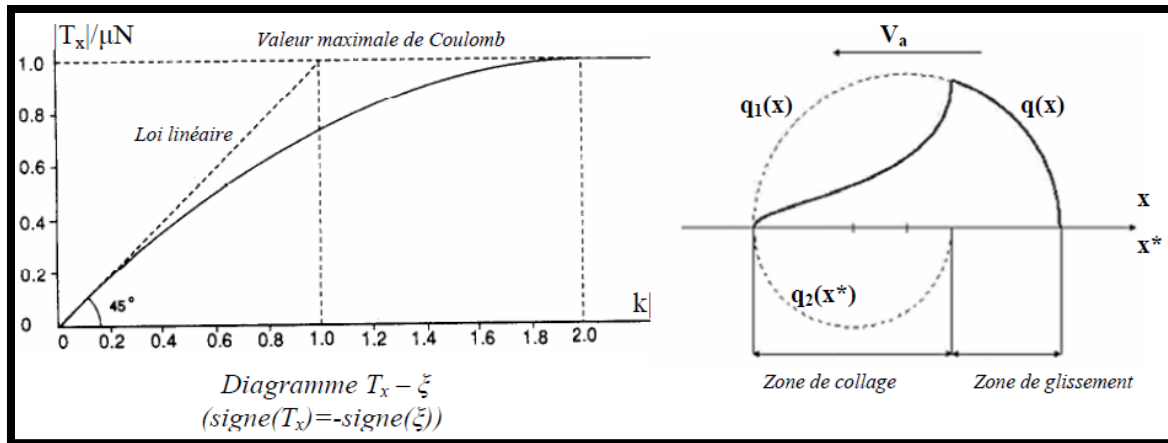


Figure I.3. Théorie de Carter.

I.5.3 Théorie de Kalker

Les théories de Kalker (simplifiée, linéaire et complète) sont particulièrement dédiées au contact roue-rail. Les algorithmes dérivés de celles-ci sont donc naturellement implantés dans la plupart des logiciels multicorps de dynamique ferroviaire actuels.

La première théorie de Kalker est « la théorie linéaire » (1967). Cette théorie est basée sur la linéarisation de la formule de Carter. Cependant, cette théorie n'est valable que sous les conditions suivantes : Le taux de glissement ξ est petit ; La zone de contact est elliptique hertzienne ; Le roulement se passe dans la direction de l'un des axes de l'ellipse (approximation pour le contact rail roue).

La deuxième théorie de Kalker est « la théorie simplifiée » (1973-1989). Cette théorie résout d'abord le problème normal du contact roue – rail, géométrie et champ de pression, par la théorie de Hertz. Ensuite, les taux de glissement, estimés géométriquement au centre de l'ellipse de contact, sont considérés constants sur l'ensemble du contact. Afin de déterminer les efforts tangentiels induits par ces glissements, le contact est discrétisé en bandes parallèles indépendantes orientées parallèlement au sens de circulation du véhicule. Chaque bande est alors modélisée par un ensemble de trois ressorts orthogonaux dont les raideurs, appelées aussi coefficients de glissement de Kalker (C_{ij}), sont constantes en tout point de la surface de contact. Une relation linéaire est ainsi définie entre les déplacements et les efforts tangentiels. Cette théorie, avec l'algorithme FASTSIM, est particulièrement utilisée dans la littérature pour le contact roue – rail.

La troisième théorie de Kalker est « la théorie complète » (1979-1990). La roue et le rail ne sont plus des surfaces lisses du second degré comme dans la théorie linéaire et la théorie simplifiée : le contact n'est plus Hertzien et la surface de contact résultante n'est plus elliptique. La zone potentielle de contact est alors divisée en mailles élémentaires rectangulaires au sein desquelles les forces normales et tangentiels sont résolues par un schéma itératif basé sur une approche énergétique du problème.

L'hypothèse de découplage du problème tangentiel et du problème normal faite pour les deux théories précédentes n'est donc ici plus valide.

Bien que plus représentative de la réalité du contact roue – rail que les théories précédentes, la théorie complète n'est pratiquement pas utilisée dans les logiciels de dynamique ferroviaire car sa mise en application, via l'algorithme CONTACT, multiplie les temps de

calcul par 1000. D'autre part, le comportement du matériau étant élastique linéaire, cette théorie ne permet pas d'étudier les phénomènes d'usure tel que l'usure ondulatoire des voies pour les trains de marchandise. Cette théorie reste alors une référence pour les autres théories.

I.6. Modélisation mathématique du contact selon la théorie de Hertz

L'analyse de la zone de contact a été faite par Hertz en statique, sans transmission d'effort. L'application la plus simple de ce résultat utilise deux cylindres à axes perpendiculaires. Le cylindre représentant le champignon du rail a son axe parallèle à la direction x de la figure I.4, qui est la direction du déplacement. Le cylindre idéalisant la roue a son axe dirigé selon la direction y.

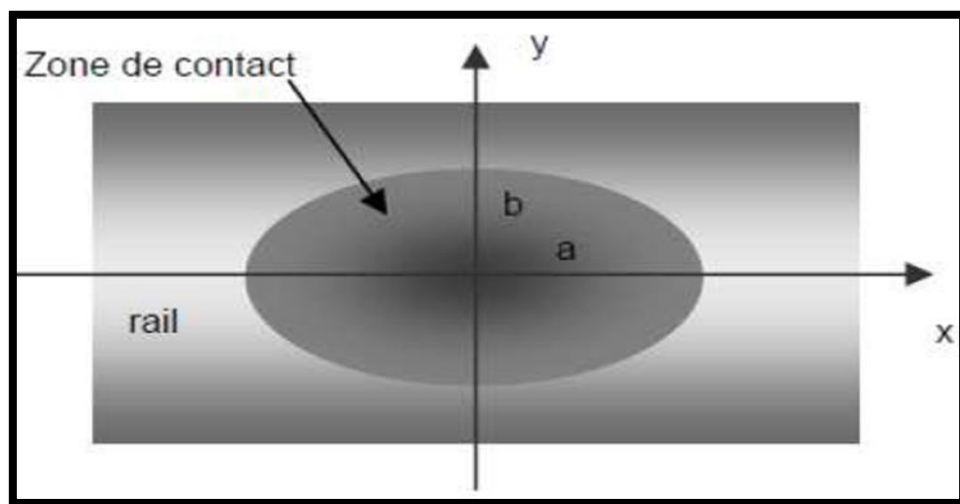


Figure I.4. Forme de la surface de contact de hertz en statique.

La surface de contact calculée analytiquement dans ces conditions, est une ellipse plane. Les demi axes a et b, de l'ellipse se calculent par les expressions :

$$\frac{a}{m} = \frac{b}{n} = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{2} \cdot \frac{k_1 + k_2}{A + B} \cdot P}$$

Où :

P [N] : la charge normale

A(m⁻¹) : Inverse du rayon du cylindre idéalisant le champignon du rail

B(m⁻¹) : Inverse du rayon du cylindre idéalisant la roue

m, n : Coefficients sans dimension dépendants de l'angle θ (°) défini par la relation :

$$\cos \theta = \frac{B - A}{A + B}$$

La fatigue due au contact roue-rail dans la voie ferrée.

k_1, k_2 : Constantes dépendant du module d'élasticité E (module de Young) et du coefficient de Poisson μ des aciers de la roue et du rail par la relation $k_i = \frac{1-\mu_i}{\pi E_i}$

La pression, en un point de la surface, en fonction des coordonnées x et y de ce point est calculable par :

$$P(x, y) = \frac{3.P}{2.\pi.a.b} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}$$

La pression maximale est obtenue au centre de l'ellipse pour $x = 0$ et $y = 0$:

$$P_{max} = \frac{3.P}{2.\pi.a.b} = \frac{3}{2} P_{moyenne}$$

Avec :

$$p_{moyenne} = \frac{P}{S}$$

Le tableau suivant montre les dimensions habituelles du matériel roulant et les résultats du calcul :

Tableau I.2. Les dimensions habituelles des différents matériels roulants.

Désignation	Rayon du cercle roulant (mm)	Charge par roue P (KN)	a (mm)	b (mm)	P_{max} (N/mm ²)
Locomotive	620	100	7.1	8.1	830
Wagon voyageur	460	60	5.2	7.2	760
Wagon marchandises	460	80	5.7	7.9	850

I.7. La fatigue du rail

Les roues assurent le roulement sur rail. En service la roue transmet les forces entre le véhicule et les rails. Ces forces induisent des champs de contraintes complexes et notamment des contraintes d'HERTZ dans les jantes, dues aux contacts répétés « roue-rail ». Celles-ci peuvent générer des fissurations internes par fatigue, parallèles à la table de roulement pour peu qu'elles trouvent un point d'amorçage. Et Comme toute pièce sollicitée de manière cyclique, les rails de train sont confrontés aux problèmes associés à la fatigue des matériaux. Dans la plupart des cas recensés, leur apparition est due à des impacts d'objets externes lors du fonctionnement en service (ballast) ou bien à des défauts d'usinage ou de fabrication.

I.8. Fatigue du contact roulant (Rolling Contact Fatigue)

Quand une roue roule sur un rail, la contrainte résultante peut être évaluée selon la théorie de Hertz. La surface de contact est presque elliptique.

Le chargement de la roue génère une pression directe sur le rail, d'où, une contrainte de cisaillement se produit sous la surface du rail. Cette contrainte est maximale à une profondeur de 6 mm de la surface du rail, cette valeur peut augmenter jusqu'à 1300 N/mm² avec un essieu de 22.5 t. Ces contraintes sont plus importantes que celles admissibles de l'acier de rail, des déformations plastiques se manifestent dans les surfaces de contact de ce dernier avec chaque passage du véhicule ferroviaire.

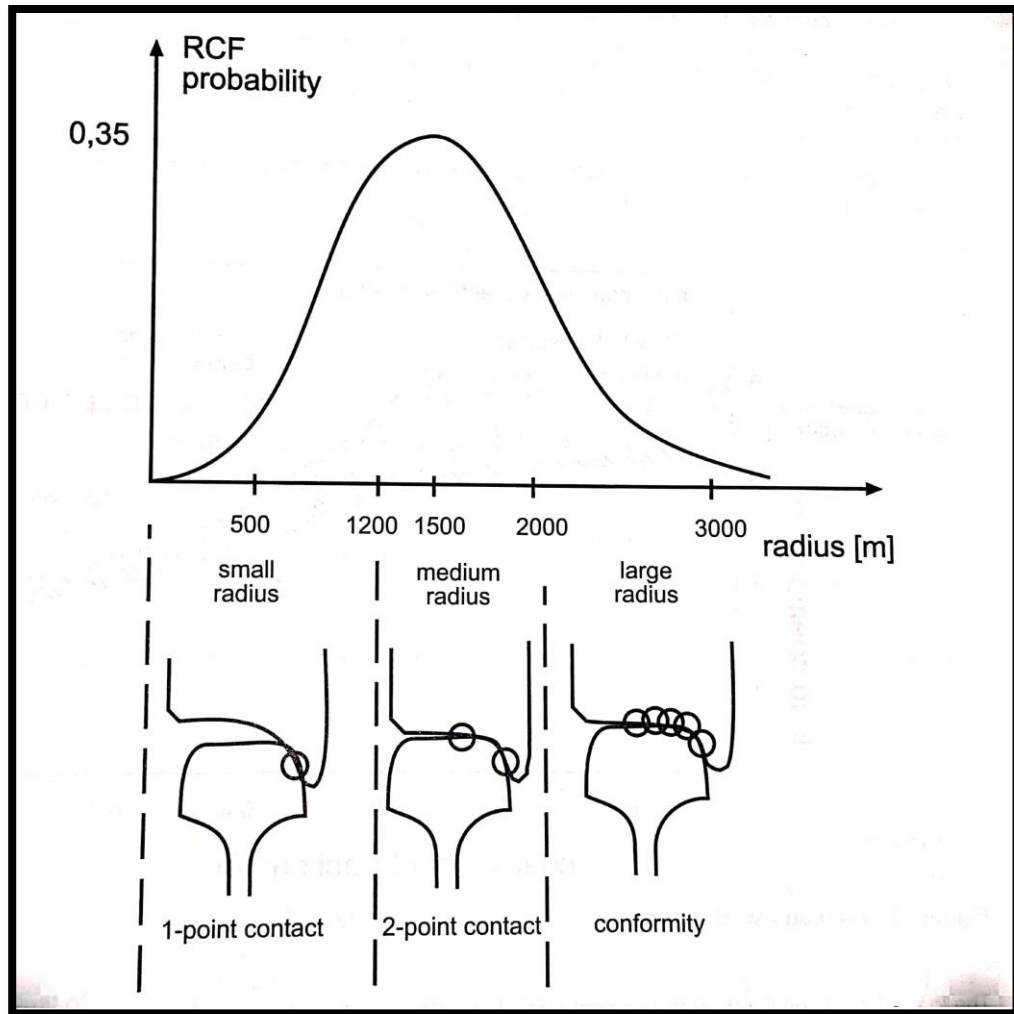


Figure I.5 . Probabilité d'occurrence de RCF et les surfaces de contact en fonction du rayon de courbure.

Dans les courbes extrêmes, il est prévu que la contrainte directe atteigne 2500N/mm^2 . Les mouvements sinusoïdaux à l'accélération et au freinage introduisent d'autres forces longitudinales.

Les surfaces de contact importantes, causent le minimum d'usure, cependant, des contraintes importantes s'appliquent sur la surface de contact, d'où, cette surface est sujette à une fatigue.

Si deux points de contact existent, le bord courant est exposé à une contrainte très importante et à l'usure, mais pas de fatigue.

Si le contact est dans un seul point, il en résulte une usure et fatigue moyenne, et manifeste une tendance moyenne à se fissurer.

I.8.1. Mécanisme du RCF

En général, on observe trois phases d'apparition et de développement pour ce type de défaut :

I.8.1.1. Phase 1

Les fissures sont créées par les déformations plastiques sévères sur la surface du rail. A cause de ces déformations plastiques, le matériau sur la surface du rail devient plus dur et plus fragile. Les micro – fissures apparaissent sur la surface ou près de la surface du rail et elles s’amplifient dans la tête du rail très vite au début et de moins en moins vite quand elles rentrent dans la tête du rail. Ces fissures s’inclinent suivant un angle d’environ 15° selon la direction de roulement.

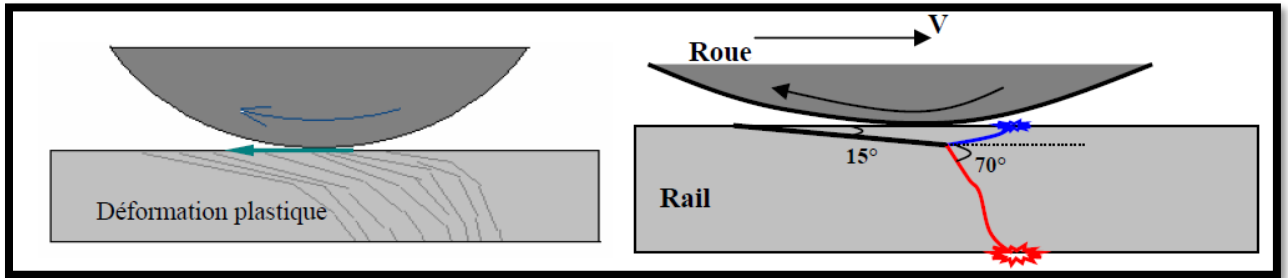


Figure I.6. Apparition et propagation des fissures par fatigue du rail.

I.8.1.2. Phase 2

La propagation des fissures se poursuit dans la même direction inclinée à cause du champ des contraintes de contact roue – rail. Les contraintes de cisaillement inverse font d’abord augmenter la vitesse de propagation des fissures quand la profondeur des fissures augmente. Ensuite, cette vitesse atteint une valeur maximale et puis diminue à cause de la diminution des contraintes par rapport à la distance à la surface du rail. Typiquement, la profondeur de la zone d’influence du champ des contraintes de contact roue – rail est de l’ordre de 10 à 15 mm.

I.8.1.3. Phase 3

Les contraintes élevées et les contraintes résiduelles dans le rail causent les différentes fissures avec différentes directions (vers le haut et vers le bas). Les fissures vers le haut produisent des copeaux. Les fissures vers le bas, avec un angle d’environ 70° , peuvent causer une propagation continue des fissures jusqu’à la rupture du rail.

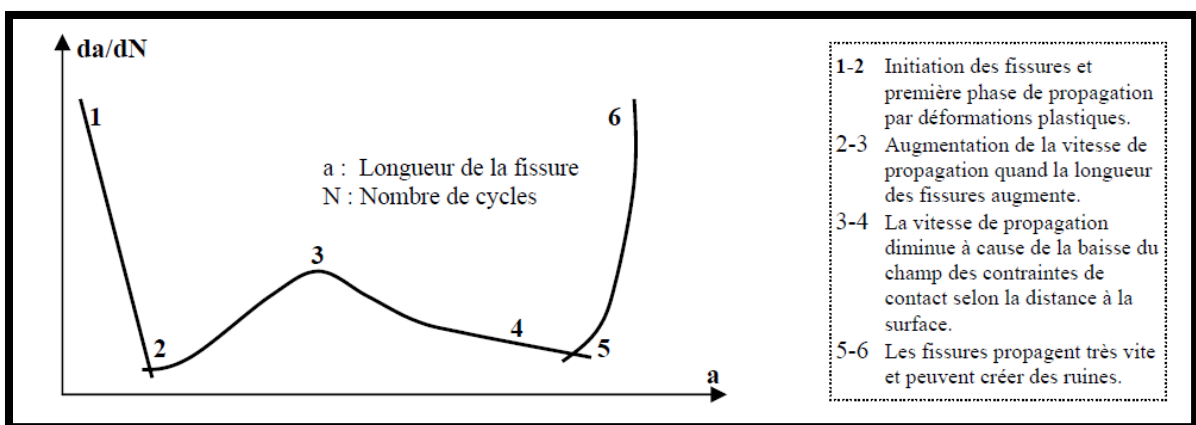


Figure I.7 Vitesse de propagation des fissures du rail selon leur longueur.

I.8.2. Défauts dus à la fatigue du contact roulant

L’un des plus importants avantages dans le chemin de fer, est la faible résistance de roulement de la roue sur le rail. Le prix que doit être payé pour cet avantage, est la contrainte

importante qui peut atteindre 1000 kN/mm^2 et qui peut causer des déformations plastiques au niveau de la roue et le rail, particulièrement quand les forces tangentielles (accélération, freinage, glissement) s'exercent en même temps avec les forces verticales.

I.8.2.1. Head checks

Les Head checks sont des défauts résultants de la fatigue du contact roulant. Ils sont reconnus comme des fines fissures sur les surfaces du rail, ces fissures se produisent sur des intervalles de 0.5 à 10 mm. Elles sont situées, vue d'en haut, à un angle de 35° à 70° par rapport à l'axe longitudinal du rail. Les fissures pénètrent à l'intérieur avec des angles aigus, d'où, les head checks sont considérés comme des défauts dangereux d'un chemin de fer.

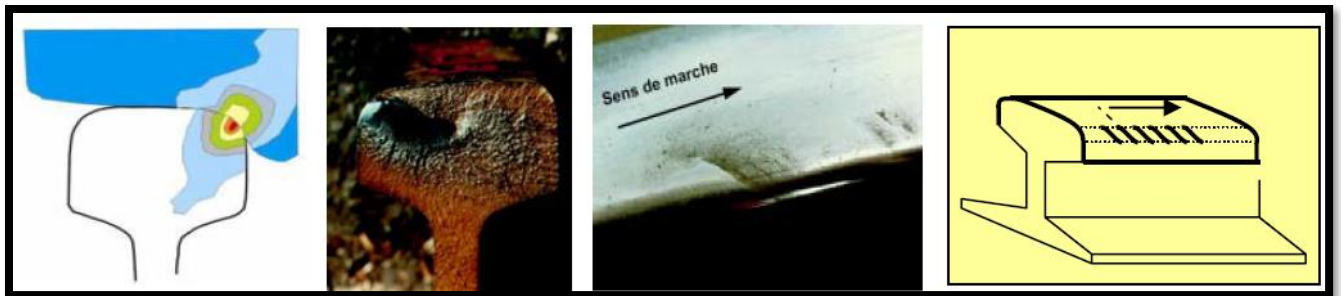


Figure I.8. Head checks.

Ce phénomène se produit dans :

- Le rail extérieur dans les courbes de rayons allant à 1200 m.
- Les deux rails (en alternance) dans les alignements et les courbes de rayons supérieurs à 2000m.
- Dans la surface de roulement des deux rails.
- La gravité et la probabilité d'apparence des fissures dépend de deux paramètres principaux : le rayon de courbure, et le type de traverses utilisées.

I.8.2.2. Belgrospis

Ce défaut est un groupe de fissure produites à une distance de 20 à 100 mm. Il est observé principalement dans les chemins de fer ayant des vitesses supérieures à 200km/h. Vue d'en haut, l'angle de fissure fait un angle de 45° avec l'axe longitudinal du rail. Les fissures se propagent en diagonal vers le rail intérieur.

I.8.2.3. Squats

Les squats sont des fissures demi-circulaires ou en forme de V, ils se produisent sur la surface du champignon du rail, ouvert dans la direction de roulement, avec des indentations simultanées sur cette surface.

Ce phénomène se produit dans les alignements, généralement dans les lignes de vitesse supérieure à 200km/h.

Il est également fréquemment observé sur les soudures électriques et aluminothermiques et dans les zones d'usure ondulatoire. La position des squats sur les rails est de nature aléatoire et peut se manifester en de nombreux points, ce qui les rend dangereux en raison du risque de ruptures multiples avec lacunes importantes.

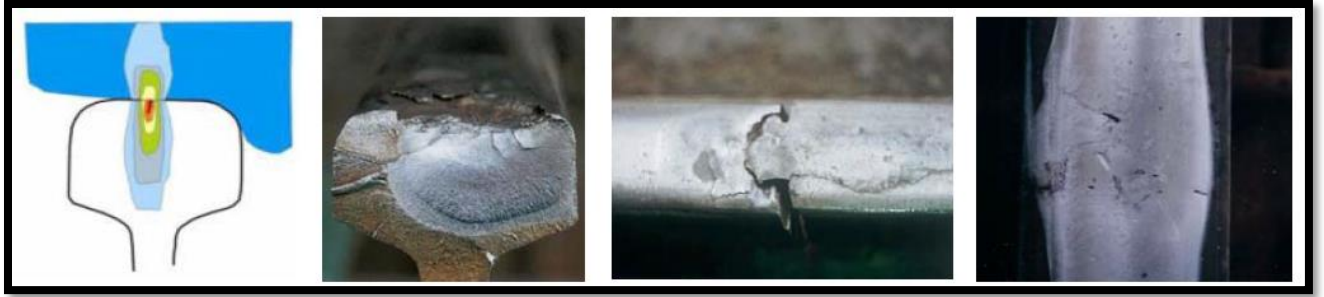


Figure I.9. Squats.

I.8.3. Modèles existants de prédiction de RCF du rail

Afin de mieux contrôler le problème de rupture du rail à cause de la fatigue, de nombreux auteurs ont proposé des modèles plus ou moins complexes. Ces modèles peuvent être classés en trois grandes familles : « Shakedown map », « damage function » et Critère de DangVan.

I.8.3.1 Modèle du Shakedown map

Pour les matériaux élasto-plastiques soumis à un chargement périodique, on montre qu'ils ont une réponse asymptotique périodique en contrainte. L'état asymptotique (lorsque le temps t tend vers l'infini), caractérisé par l'évolution de la déformation inélastique et de l'écrouissage, peut-être une adaptation (une réponse asymptotique élastique), une accommodation (une réponse limite en boucle fermée) ou un rochet (une accumulation de déformation plastique).

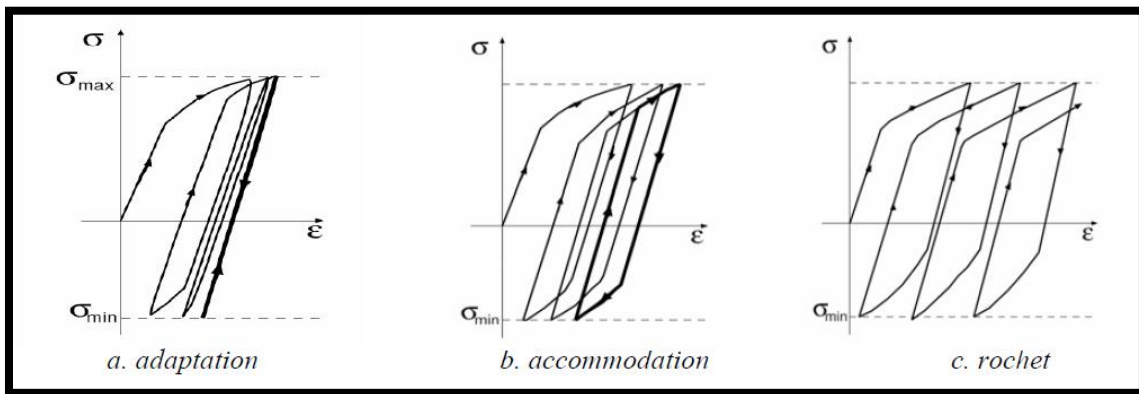


Figure I.10. Comportement asymptotique des matériaux élasto-plastiques.

Ponter et al. (1985) ont publié un article traitant le problème du contact roulant d'un solide sur un demi-espace élastique plastique parfait, avec les hypothèses ci-dessous :

- Matériau élastique plastique parfait
- Zone de contact est un cercle ($a=b$)
- Efforts normaux de Hertz
- Glissement total dans la zone de contact
- Pas de déformation latérale

- Charge répétée sur une ligne droite

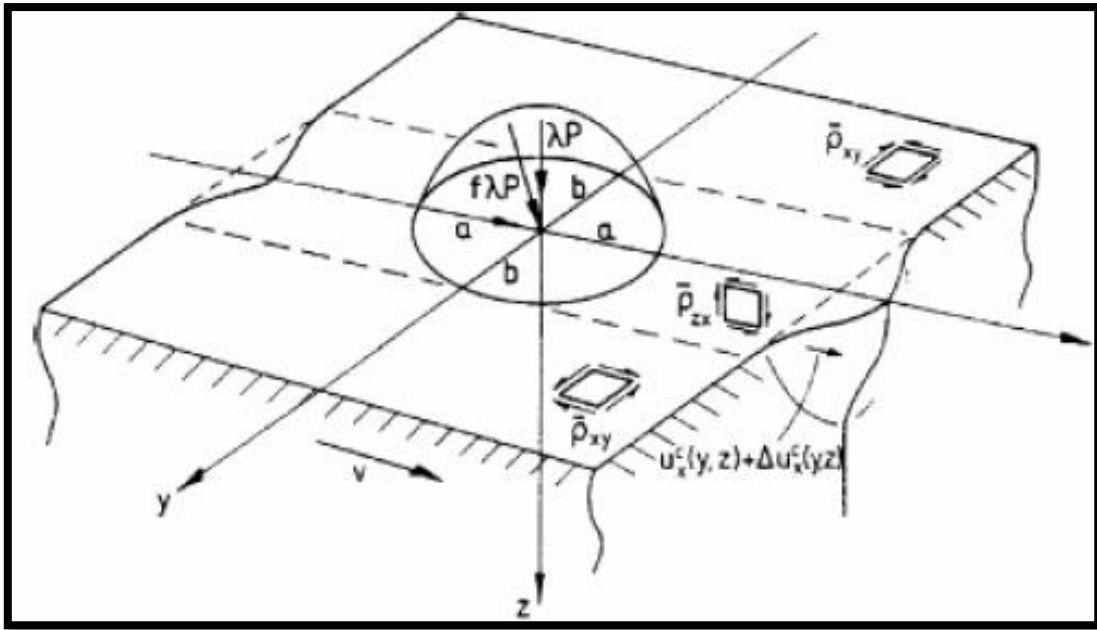


Figure I.11. Problème de Ponter et al.

La solution de ce problème est présentée sous forme d'un « shakedown map ».

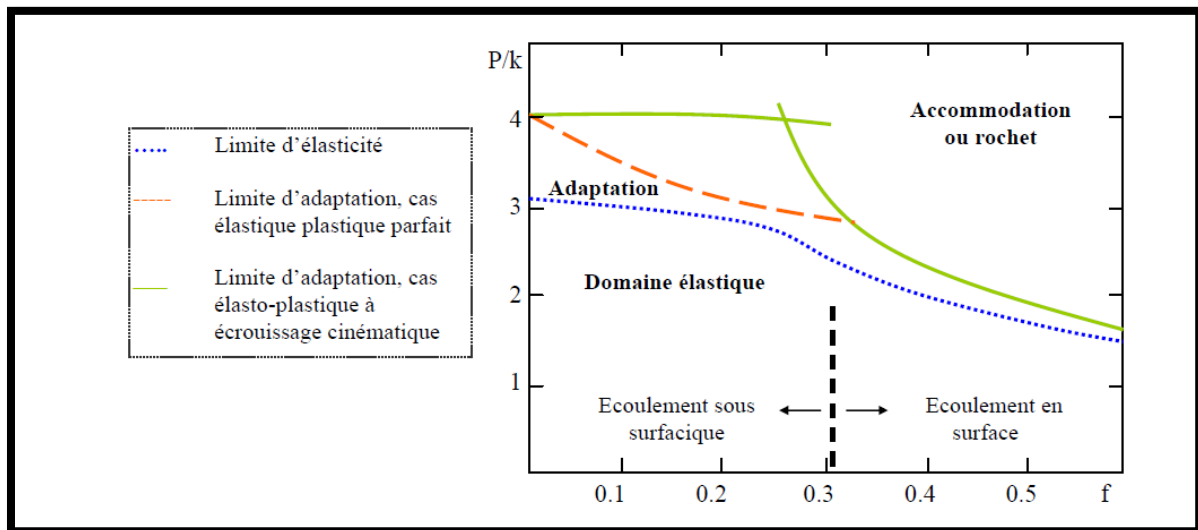


Figure I.12. Shakedown Map.

Depuis sa publication, ce « shakedown map » est utilisé, en le combinant avec les calculs dynamiques multi-corps, par beaucoup de praticiens dans le domaine ferroviaire. Cependant, la plupart d'entre eux ne vérifient pas les hypothèses ci-dessus.

Dans un autre article récent, Ponter (2006) a montré, en utilisant une méthode numérique, que ces limites d'adaptation dépendent fortement de la taille de l'ellipse de contact (a/b) et aussi des efforts tangentiels (F/Q).

Ekberg et al. (2002) ont utilisé la même idée afin de proposer un modèle simple que les ingénieurs peuvent facilement utiliser pour prédire l'initiation des fissures par fatigue sur la

surface du rail. Ils modélisent la courbe de frontière du domaine de rochet par une équation simple $v = 1/\mu$.

Ensuite, ils comparent le coefficient de frottement avec la valeur calculée par cette courbe en introduisant un paramètre « fatigue index » ($F_{isurf} = \mu - 1/v = \mu - 2\pi abk/3F$).

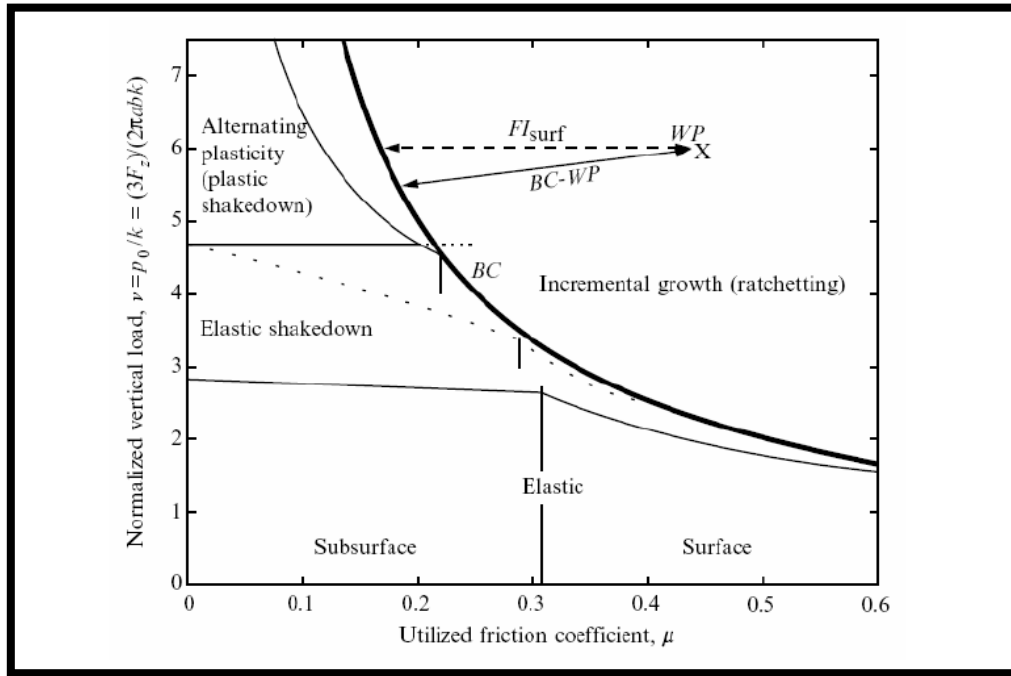


Figure I.13. Modèle de Ekberg -Fatigue index.

L'avantage de cette approche est qu'elle est simple à utiliser et qu'il n'y a pas beaucoup de paramètres à identifier. Cependant, cette méthode ne nous donne que quelques indications sur la possibilité d'apparition des fissures par fatigue avec un faible nombre de cycle de chargement. Elle peut être utilisée pour comparer la performance en fatigue de deux types de rail, par exemple. On ne peut prédire ni le nombre de cycles de chargement, ni la position des fissures.

I.8.3.2. Paramètres d'endommagement par fatigue

L'idée principale de ces modèles est de définir un paramètre d'endommagement par fatigue, permettant de prédire le risque d'avoir des fissures par fatigue sur la surface de roulement du rail. En général, ce paramètre d'endommagement est fonction de différents paramètres du contact roue – rail (les efforts tangentiels, le coefficient de frottement, l'énergie de glissement).

La première méthode utilisée pour définir ce paramètre d'endommagement est basée sur le «Shakedown map ». Il existe également d'autres modèles de ce type, par exemple : « shakedown exceedance – B» ou « Propensity – A».

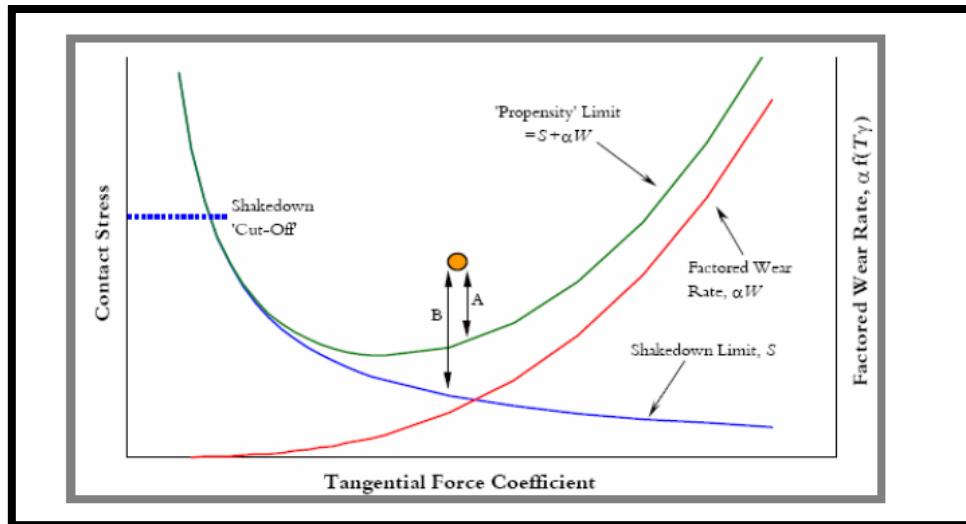


Figure I.14. Shakedown excedance et Propensity.

Sinclair et Allery (199) ont introduit un autre paramètre d'endommagement ($T\sigma$) pour prédire l'initiation des squats. Ce paramètre est identifié à partir d'essais en laboratoire. Comme le « shakedown excedance », ce paramètre ne prend pas en compte l'influence de l'usure.

Pour surmonter ce problème, les auteurs ont proposé de n'utiliser ce modèle que pour les voies de rayon plus grand que 1000m (car pour les voies en courbe de faible rayon, l'usure est sévère).

Dans le cadre du projet « Whole Life Rail Model – WLRM », conduit par « The Rail Safety and Standard's Board – RSSB » entre 2002 et 2004, le paramètre T-gamma (produit des efforts tangentiels et des taux de glissement) est utilisé pour prédire la fatigue de roulement du rail (fig.I.15). Ce modèle permet d'avoir une compétition entre l'usure et la fatigue de roulement du rail. Si T-gamma est inférieur à un certain seuil, il n'y a pas de dommage. Si T-gamma est petit (entre 15 et 65 J/m) le phénomène de fatigue domine l'usure. Si T-gamma est très grand (supérieur à 175 J/m), l'usure domine la fatigue. Pour les valeurs intermédiaires de T-gamma, les deux phénomènes de fatigue et d'usure co-existent.

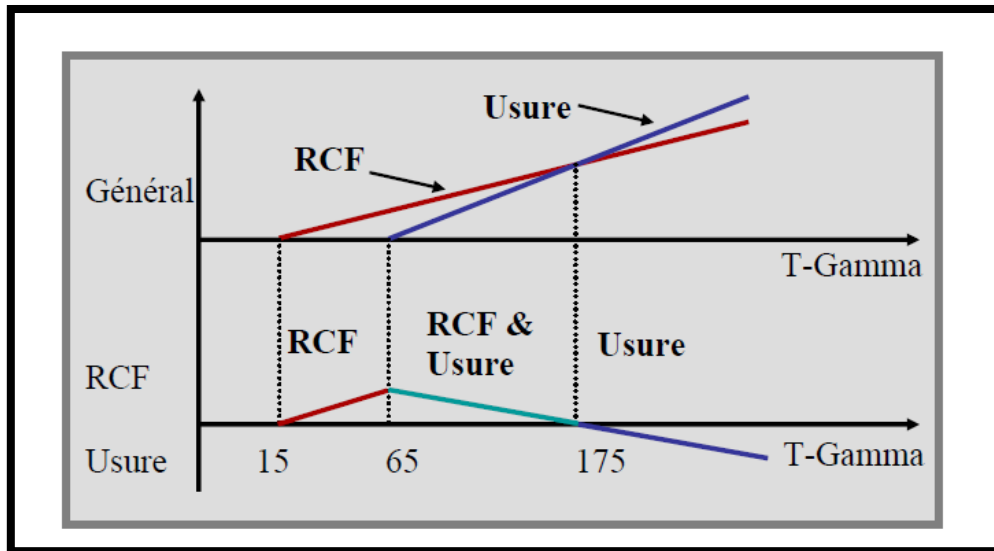


Figure I.15. Modèle T-Gamma.

Pointner et Donawitz (2008) ont proposé une carte d'endommagement prenant en compte deux paramètres : la contrainte tangentielle et la vitesse de glissement relatif dans la zone de contact.

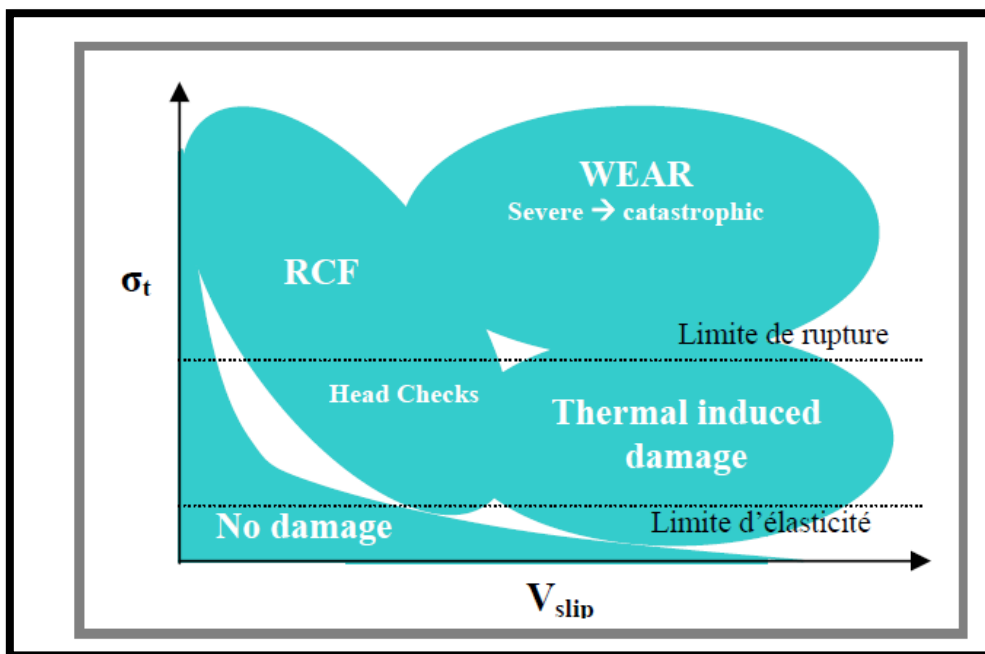


Figure I.16. Présentation de Pointner et Donawitz.

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, l'objectif a été de présenter une vue globale sur le contact entre la roue et le rail dans une voie ferrée, ainsi que les problèmes causés par ce dernier.

Plusieurs théories ont été établies pour mieux comprendre ce phénomène, ce dernier est modélisé selon ces théories afin de déterminer les contraintes limites que le rail peut subir avant sa déformation et éventuellement, sa fatigue.

La fatigue due au contact roue-rail dans la voie ferrée.

La modélisation de la surface de contact la plus reconnue est celle de HERTZ, qui a facilité les études sur la fatigue due au contact roulant RCF.

Le RCF est le type de fatigue le plus courant dans le domaine ferroviaire qui résulte en nombreux défauts du rail, c'est pour cela que les modèles de prédiction de RCF ont été développés dans le temps.

Prévoir le RCF mène à la prédiction de l'usure du rail, d'où, la prévention de sévères accidents de trafic ferroviaire.

Enfin, la fatigue du rail est un problème que l'on doit éviter dans le domaine du transport ferroviaire.

CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET.

II.1. Introduction

Dans le cadre du développement des transports ferroviaires en Algérie, L'Agence Nationale d'Étude et de Suivi des Réalisations des Investissements Ferroviaires (ANESRIF) a lancé un programme de restructuration du réseau ferroviaire nationale par la modernisation des lignes existantes et la construction de nouvelles lignes modernes.

L'Algérie se dote de plusieurs nouvelles lignes ferroviaires. Installés dans des régions dispersées, des projets sont en cours de réalisation.

Au total, 1116 Kilomètres de chemins de fer sont actuellement en chantier dans le cadre du programme de densification et de modernisation du réseau. Certains sont déjà achevés, ou presque. D'autres sont en phase d'études.



Figure II.1. Les grands axes du plan de modernisation du rail en Algérie.

II.2. Description globale du projet

Dans le cadre de la réalisation de la rocade des hauts plateaux, une ligne ferroviaire reliant la nouvelle ville de Boughezoul à la ville de M'sila a été jugée nécessaire.

Le projet a pour objet l'élaboration de l'étude d'avant-projet détaillé (APD), pour la réalisation d'une nouvelle ligne ferroviaire à voie unique entre Boughezoul et M'sila à une vitesse de 160 km/h.

Cette ligne débute à l'intersection de la rocade des Hauts Plateaux Ain Oussera-Tiaret-Saida avec la ligne projetée Boumedfaa-Djelfa, et s'achève à M'sila à l'intersection de la ligne de Bordj Bou Arreridj avec celle de Ain Touta.

II.3. Localisation du projet

Le projet se situe dans la région du Hodna, qui est un vaste territoire intégrant les régions de la bordure Nord de l'Atlas saharien au Sud, les monts de Diss à l'Ouest, les Monts de Bellezma à l'Est et les monts du Hodna au Nord.

Le PK 0+000 (PK 155+100 de la rocade des Hauts Plateaux) origine de la nouvelle ligne ferroviaire se trouve au niveau de la nouvelle gare intermodale de la nouvelle ville de Boughezzoul. Elle traverse la wilaya de Médéa par une seule commune, ensuite la commune de Birine dans la wilaya de Djelfa. Le reste du tracé se situe dans la wilaya de M'sila, il traverse les communes de Bouti Sayah et Ain Lahdjal, pour enfin s'achever à M'sila.

Le tronçon objet de l'étude débute au PK160+000, il se termine au niveau de la gare de Birine, au PK171+000.

II.4. Objectifs du projet

Les motifs essentiels qui ont conduit à la nécessité de réalisation d'une nouvelle ligne ferroviaire entre Boughezzoul et M'sila sont :

- La correction des déséquilibres régionaux.
- Le désenclavement de certaines régions.
- L'ouverture des régions les aunes aux autres.
- Le développement économique régional, local et l'aménagement du territoire.
- Répondre aux besoins de confort et sécurité des voyageurs.
- Répondre aux besoins de développement des zones industrielles.

II.5. Présentation de la zone d'études

La zone d'études en question se situe en 3 wilayas adjacentes. Cette région fait partie du vaste domaine des nappes telliennes. Ces terrains au niveau de Birine sont constitués d'une alternance de bancs calcaires, de marnes et de grès.

La région étudiée fait partie de la plaine du Hodna connue par l'importance de ses dimensions, par sa structure en cuvette. Elle constitue de ce fait, un ensemble aquifère caractérisé par un excellent réservoir d'eau souterraine renfermant des nappes de bonne qualité artésiennes au centre du bassin, reconnues par forages depuis des siècles. Elle est aussi considérée comme transition entre le nord et le sud algérien, elle est principalement composée de steppes.

II.5.1. Démographie

La région connaît une augmentation de son poids démographique pour diverses raisons telles que l'importance apportée à cet espace dans la politique nationale algérienne d'aménagement du territoire. Il enregistre en 2008 un poids démographique de 27,3 % contre 26,5 % en 1998. Les taux de croissance démographique enregistrés sont relativement plus élevés que la moyenne nationale (1,6 %) : ils se situent à 3,8 % pour la région Centre, 1,95 % pour la région Ouest et 1,51 % pour la région Est.

II.5.2. Relief

Les Hauts Plateaux sont situés entre l'Atlas tellien au Nord et l'Atlas saharien au Sud, à des altitudes plus ou moins importantes de 900 à 1 200 m. Ils sont constitués de dépressions salées, chotts ou sebkhas et ils sont séparés du Sahara par l'Atlas saharien, qui forme une succession de chaînes au caractère aride. Deux grands ensembles sont distingués :

- les steppes occidentales, qui sont situées dans le Sud oranais et le Sud algérois. L'altitude de ces hautes plaines décroît du Djebel Mzi à l'Ouest à la dépression salée du Hodna au Centre.
- les steppes orientales à l'Est du Hodna, qui sont situées dans le Sud constantinois. Elles sont bordées par le massif des Aurès et des Nementcha.



Figure II.2. Photo représentant le relief.

II.5.3. Climat

Le climat de la région est dit "de steppe". Il y a peu de précipitations, quel que soit la période de l'année. En moyenne la température est de 13.4 °C. Les précipitations annuelles moyennes sont de 338 mm.

Le mois le plus sec est celui de Juillet avec seulement 8 mm. Le mois de Mars, avec une moyenne de 37 mm, affiche les précipitations les plus importantes.

Avec une température moyenne de 24.2 °C, le mois de Juillet est le plus chaud de l'année. Au mois de Janvier, la température moyenne est de 4.5 °C. Janvier est de ce fait le mois le plus froid de l'année.

Tableau II.1. Tableau climatique de la région d'études.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Température moyenne (°C)	4.5	5.7	8.2	11.4	15.5	20.1	24.2	23.9	19.7	13.6	8.7	5.2
Température minimale (°C)	-0.4	0.1	2.3	4.5	8.5	12.5	15.5	15.3	12.5	7.5	3.4	0.3
Température maximale (°C)	9.4	11.3	14.2	18.3	22.6	27.8	32.9	32.5	26.9	19.8	14.1	10.1
Précipitations (mm)	32	31	37	29	38	25	8	16	29	33	35	27

II.5.4. Sismicité

Les cartes sismiques et les analyses tectoniques qui ont été faits montrent une échelle qui allant de sismicité négligeable jusqu'à sismicité très élevée selon des zones sismiques tel que :

Zone 0 : sismicité négligeable.

Zone I : sismicité faible.

Zone II a : sismicité moyenne.

Zone II b : sismicité élevée.

Zone III : sismicité très élevée.

D'après le Règlement Parasismique Algérien « RPOA 2008 », la région d'études appartient à une zone sismique « I » caractérisé par une sismicité faible.

Le niveau minimal de protection sismique accordé à un ouvrage dépend de sa situation et de son importance vis-à-vis des objectifs fixés par la collectivité.

Tout ouvrage qui relève du domaine d'application des règles parasismiques algériennes RPOA 2008 doit être classé dans l'un des trois groupes définis ci-après :

- **Groupe 1** Ouvrages d'importance stratégique.
- **Groupe 2** Ouvrages de grande importance.
- **Groupe 3** Ouvrages d'importance moyenne.

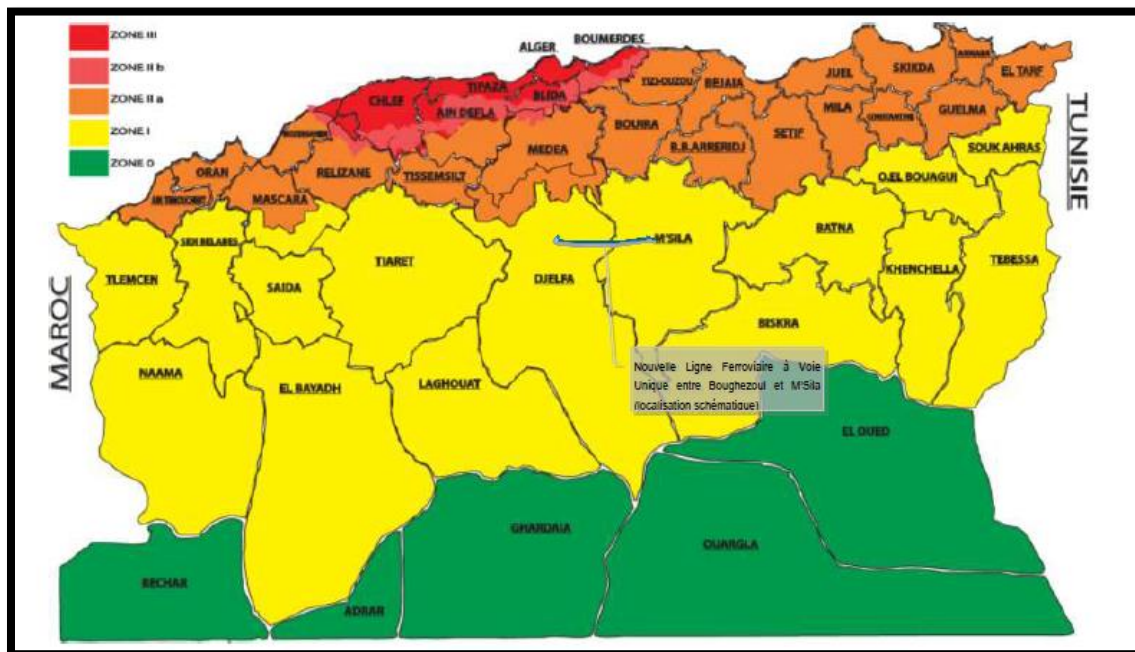


Figure II.3. Carte de zonage sismique d'Algérie (RPOA 2008).

La valeur du coefficient d'accélération – A – est déterminée conformément à la relation suivante entre le groupe d'encadrement de l'ouvrage et la zone sismique correspondante.

Tableau II.2. Coefficient d'accélération A.

Groupe	Zone			
	I	II A	II B	III
1	0.15	0.25	0.30	0.40
2	0.12	0.20	0.25	0.30
3	0.10	0.15	0.20	0.25

Sur la base de ce qui précède, l'ouvrage est caractérisé comme suit :

- Le site étudié se situe dans la zone I, qui correspond à une zone de sismicité faible.
- La Nouvelle Ligne Ferroviaire à Voie Unique – entre environ Boughezoul et M'Sila est considérée comme un ouvrage de grande importance (groupe 2).

A partir de ces données le coefficient d'accélération à utiliser sera $A = 0.12 \text{ g}$.

II.6. Données du projet

Cette étude sera élaborée à une voie et compte-tenu des impératifs suivants :

II.6.1. Vitesse de base

Vitesse maximale (train rapide) : 160km/h.

Vitesse minimale (train de marchandise) : 80km/h.

II.6.2. Conditions d'élaboration du tracé en plan

Tableau II.3. Conditions d'élaboration du tracé en plan selon référentiel SNTF.

Paramètre cinématique	Valeur normale	Valeur exceptionnelle
Rayon minimum en plan (m)	1100	975
Dévers maximum (mm)	120/160	180

II.6.3. Conditions d'élaboration du profil en long

Tableau II.4. Conditions d'élaboration du profil en long selon référentiel SNTF.

Paramètre cinématique	Valeur normale	Valeur exceptionnelle
Déclivités maximums des pentes et rampes en pleine voie	16‰	18‰
Déclivité maximum des pentes et rampes en gare et évitement	0 ‰	-
Rayon de raccordement en profil minimum (m)	8900	6500

II.6.4. Superstructure et infrastructure de la voie

- Classification de la ligne :
Le trafic traversant cette ligne est classé en groupe UIC 4.
- Type de rail :
UIC 60-E1

- Type de traverses :

Les traverses bi-bloc en béton armé pour rail 60-E1 sont utilisées dans toutes les sections de voie courante.

Les voies de service, les voies d'évitements et les voies tiroirs seront équipées aussi de rails 60-E1 posés sur des traverses bi-bloc de type VAX U31.

- Type d'attache :

Les attaches sont les pièces responsables de fixer les rails aux traverses. Le système recommandé est une attache à lame de type Nabla.

- Ecartement de la voie :

L'écartement normal standard qui est de 1435 mm.

- Largeur de la plateforme :

La largeur de la plate-forme en double voie est fixée à 13,60 m avec un entraxe de 4,20 m.

La largeur de la plate-forme en voie simple est fixée à 8 m.

II.7. Conclusion

Notre projet consiste à faire une étude APD de la nouvelle ligne à voie unique électrifiée reliant la ville de Boughezzoul à la ville de M'sila, de la section allant du PK160+000 jusqu'au PK171+000 avec la conception de la nouvelle gare de Birine tout en respectant les normes.

CHAPITRE III : LES CONSTITUANTS DE LA VOIE.

III.1. Introduction

Une voie ferrée est un chemin de roulement pour trains constitué de deux files de rails dont l'écartement est maintenu constant par une fixation à l'aide des attaches sur des traverses, reposant elles-mêmes sur du ballast.

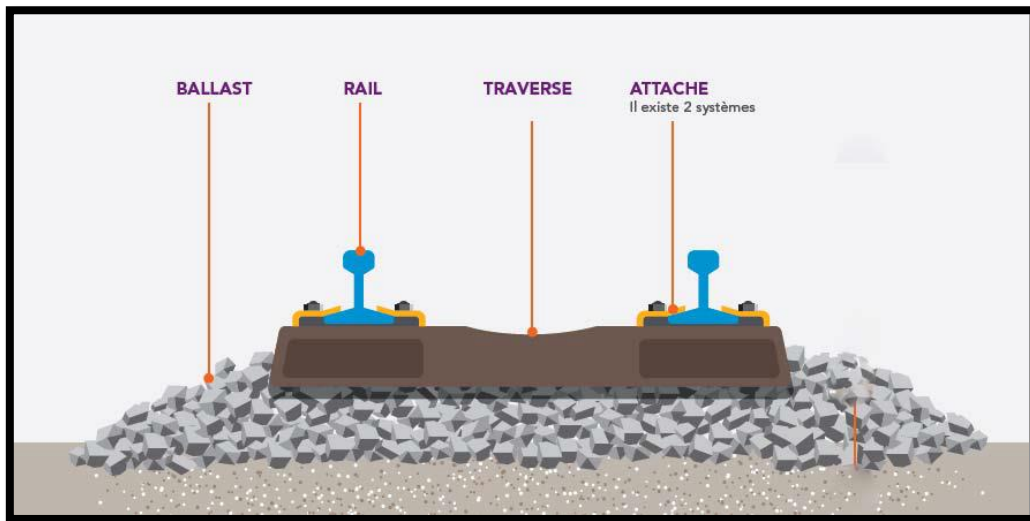


Figure III.1. Constituants de la superstructure de voie ferrée.

Elle contient aussi des éléments qui permettent d'assurer le support et le guidage du matériel roulant ferroviaire sur un itinéraire donné, ce sont les branchements et les traversées.

III.2. Les catégories de voies

Les voies sont classées en plusieurs grandes catégories, chacune sous-entendant une vitesse maximale et une charge à l'essieu. On distingue ainsi :

- les voies principales, qui sont affectées à la circulation des trains.
- les voies de circulation, qui sont affectées à une desserte interne dans des grands complexes ferroviaires.
- les voies de service, qui sont affectées aux manœuvres, qui peuvent être quelquefois d'anciennes voies principales déclassées.
- les voies d'évitement, permettent à deux trains circulant en sens contraires sur une voie unique, de se croiser (voir l'exemple des funiculaires).
- les voies de garage, qui sont des voies de service affectées au stationnement du matériel roulant.

La distinction entre les voies de service et de garage n'est pas toujours évidente. Ces voies peuvent faire partie de réseaux plus globaux incluant le ferroutage dans le cadre de l'intermodalité des transports.

III.3. Le rail

Le rail est une longue barre d'acier profilée, mises bout à bout servent à former un chemin de fer. C'est le premier élément en contact entre le véhicule et la voie, il sert au guidage des roues et à la transmission et la redistribution des charges verticale des roues aux traverses.

En fait, il existe trois types principaux des rails :

Les constituants de la voie.

- Les rails à double champignon (ancien modèle).
- Les rails à gorge (utilisé dans les tramways).
- Les rails Vignole.

Le type de rail utilisé dans le projet Boughezzoul-M'sila sont de type Vignole UIC 60-E1.

III.3.1. Le rail Vignole

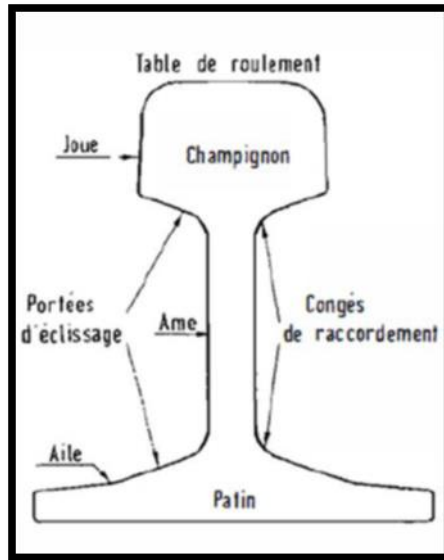


Figure III.2. Rail Vignole.

Le rail Vignole est constitué par trois parties essentielles :

- Le champignon : C'est la partie supérieure du rail, il est caractérisé par sa largeur, sa hauteur, le bombement de sa table de roulement et l'inclinaison de ces forces latérales.
- L'âme : l'âme est caractérisée par son épaisseur, la forme des congés de raccordement avec le champignon et le patin, et l'inclinaison. L'épaisseur de l'âme doit tenir compte des efforts de déversement et les efforts tranchants qu'elle supporte et des sollicitations élevées qui se développent au voisinage des trous d'éclissage.
- Le patin : Caractérisé par sa largeur et par l'épaisseur et la forme des ailes, qui sont essentiellement fixées par des considérations d'équilibrage entre la section du patin et celle de champignon et par les possibilités du laminage, sa largeur conditionne la rigidité du rail dans le plan horizontale et détermine le taux de compression sur les traverses.

III.3.2. Long Rail Soudé (LRS)

On appelle long rail soudé (LRS) une barre dont la longueur est suffisante pour qu'au moins un de ses points reste fixe, quel que soit la variation de température.

Les longs rails soudés ou LRS, appelés aussi barres longues, constituent une méthode moderne de pose des voies ferrées, les rails peuvent être soudés sur plusieurs dizaines de kilomètres sans joint de dilatation.

III.3.2.1.Libération du rail

Chaque 400m on coupe le rail soudé sachant que la distance enlevée dépend de la différence de température du jour et celle de la nuit, on devrait idéalement poser les barres longues à une température moyenne entre les extrêmes attendus appelés température de référence, la distance qui dépend de la différence de température est enlevée, y aura un vide entre le PK 400 et le PK 400+L Δ T, les extrémités sont joints grâce à un vérins puis on les fixe et on les soude à nouveau, ainsi la température de référence est atteinte le rail ne songe plus à s'allonger ni de comprimer.

III.4. Les traverses

Les traverses sont le système sur lequel repose les deux files de rail (la voie), elles assurent la transmission des efforts encaissés par les rails au ballast, et assurent au même temps le maintien de l'écartement entre les deux rails. Le nombre de traverses utilisées par Kilomètre (travelage) est généralement entre 1666-1667 traverses/Km à la SNTF, on distingue quatre types de traverse :

- Traverse en bois :

Elles constituent une grande partie des traverses utilisées dans le monde vu sa résistance, sa flexibilité et aussi pour sa facilité de mise en œuvre, Elles assurent la souplesse et l'isolement d'électricité, présentant une grande cohésion, ce sont généralement en bois de chêne ou bois hêtre.



Figure III.3. Traverse en bois.

- Traverse métallique :

Elles sont plus légères que les traverse en bois, faciles à poser, cependant, elles sont bruyantes et conductrices d'électricité, donc nécessitent des dispositifs d'isolement couteux.

Elles sont constituées d'un laminé en forme de U renversé, embouti à ses extrémités, pour former des bêtes qui s'enfoncent dans le ballast et s'opposent au déplacement transversal de la voie.



Figure III.4. Traverse métallique.

- Traverse en béton :

La traverse en béton, qui a une durée de vie plus importante (50 ans), fut introduite il y a plusieurs décennies pour pallier les inconvénients du vieillissement naturel du bois.

Les traverses en béton, par leur poids important, assurent un bon ancrage de la voie dans le ballast. Elles sont en particulier utilisées pour les lignes nouvelles à grande vitesse. La fixation des rails se fait par des attaches élastiques munies de dispositifs isolants en caoutchouc.

Il existe deux types de traverse en béton :

- La traverse bi bloc : Formées de deux blocs de béton, les blochets, reliés par une entretoise métallique, qui absorbe les efforts en milieu de traverse.
- La traverse mono bloc : formée en un seul bloc En béton précontraint, amincie dans sa partie centrale, armée de fils à haute résistance.



Figure III.5. Traverse monobloc.



Figure III.6. Traverse bi-bloc.

III.5. Les attaches

Une attache est un dispositif permettant la fixation du rail sur les traverses pour l'empêcher de tout déplacement.

Il existe plusieurs types d'attache. Elles varient en fonction du type de traverses, du type de rail, du mode de pose de la voie (LRS ou barres normales), mais aussi en fonction de l'histoire propre à chaque exploitant ferroviaire.

On peut distinguer :

III.5.1. Attaches rigides pour rails Vignole

Une attache est dite rigide si, du fait du manque de souplesse des matériaux la constituant, elle n'accompagne pas le mouvement vertical du rail lors du passage des roues. Elle assure un bon maintien transversal du rail mais ne garantit en rien son maintien longitudinal, lui permettant ainsi de cheminer, c'est-à-dire de se déplacer vers l'origine ou l'extrémité de la ligne sous les sollicitations de la dilatation ou des forces de freinage ou d'accélération des convois.

Elle ne peut donc pas être utilisée pour la confection de LRS sauf à être associée à des dispositifs anti-cheminants, s'opposant à tout mouvement longitudinal du rail.

Il existe deux types d'attache rigide :

-Les Crampons.

-Les Tire-fonds.

III.5.2. Attaches élastiques pour rails Vignole

Contrairement à l'attache rigide, l'attache dite élastique continue à assurer le maintien du rail lorsque celui-ci s'affaisse sous la charge des circulations. Elle s'oppose donc à son cheminement longitudinal et peut être utilisée pour la pose de LRS.

Les différents types d'attache élastique reposent tous sur l'utilisation d'une pièce métallique élastique (ressort) fixée à la traverse et appuyant sur le patin du rail. Lors du passage des circulations, le ressort accompagne le mouvement du rail tout en assurant constamment son action de maintien.

Les constituants de la voie.

Les différences entre attaches élastiques portent essentiellement sur le type de ressort utilisé, ainsi que sur son mode de fixation aux traverses. On peut distinguer :

- Les attaches vissées : Ressort à spires Ressort à lame, Ressort à boudin.
- Les attaches clipsées.

III.5.3. Les attaches pour rails à simple ou double champignon

Les rails à simple ou double champignon n'ayant pas de patin, il est impossible de les poser directement sur traverses. Ils reposent donc de manière indirecte sur des coussinets fixés aux traverses par des tire-fonds. Un « coin » en bois ou en métal est rentré à force entre l'âme du rail et le coussinet et assure son maintien ainsi que l'absorption des vibrations.

III.6. Les semelles

Ce sont des dispositifs posés entre le rail et la traverse , faits généralement en élastomère «caoutchouc» de 9 mm d'épaisseur à une capacité d'amortissement importante qui peut réduire considérablement les charges exercées sur les traverses.

III.7. Le ballast

Le ballast est la couche de sol sur laquelle repose une voie de chemin de fer. Il transmet au sol les efforts engendrés par le passage des trains, sans que celui-ci ne se déforme par tassement. Il sert aussi à enchâsser les traverses afin d'assurer leur résistance aux déformations longitudinales, particulièrement importante pour la technique des longs rails soudés. Les traverses reposent sur une épaisseur de 10 à 35 cm de ballast selon les caractéristiques de la ligne.

Le ballast est constitué de la roche concassée de granulométrie variant entre 31,5 et 50 mm, il ne doit pas contenir de la matière organique expansive, les métaux ou le plastique.

III.8. Les appareils de voie

Un appareil de voie est un élément de la voie ferrée qui permet d'assurer le support et le guidage du matériel roulant ferroviaire sur un itinéraire donné, lorsque d'autres itinéraires en divergent ou le traversent. Il permet entre autres d'assurer les bifurcations et les croisements d'itinéraires. En effet, le conducteur d'un train n'ayant aucune maîtrise de la direction prise par le convoi, ce sont les appareils de voie qui sont chargés de le guider et de l'orienter de façon mécanique et passive.

Il peut être commandé automatiquement ou manuellement depuis un poste d'aiguillage ou bien à pied d'œuvre (sur le terrain) par une personne habilitée.

On distingue deux types d'appareils de voie :

- Le branchement :

Il permet de créer une voie déviée à partir d'une voie directe ou d'assurer la communication entre deux voies exceptionnellement trois voies.

On distingue trois parties :

- la partie aiguillage qui comprend les aiguilles mobiles et les contre-aiguilles,
- la partie intermédiaire qui est assimilable à de la voie courante
- la partie croisement qui comprend le cœur de croisement et les contre-rails.

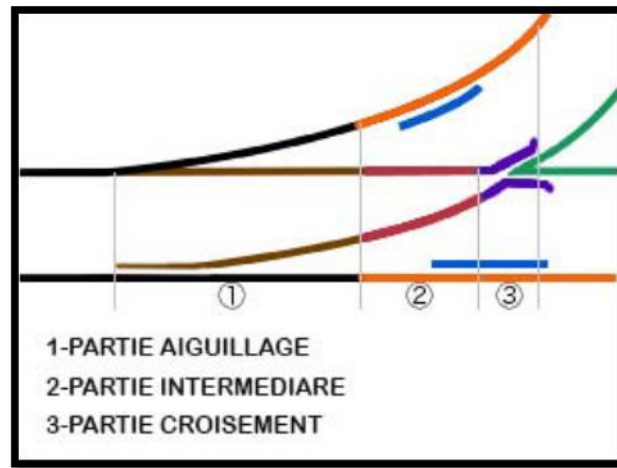


Figure III.7. Constitution d'un branchement simple.

- La traversée :

Les traversées simples permettent le croisement à niveau d'une voie par une autre, sans qu'il ne soit possible d'agir sur l'orientation des trains.

Les traversées jonction permettent le croisement à niveau d'une voie par une autre et également la jonction des deux voies. On distingue :

- Les traversées jonction simples (TJS) permettant la jonction des voies uniquement dans un sens de circulation.
- Les traversées jonction doubles (TJD) permettant la jonction des voies dans les deux sens de circulation.

Plus rare, il existe aussi des traversées perpendiculaires qui permettent le croisement de voies, Elles sont cependant plus répandues sur des voies de tramway en ville, car leur tracé dépend de l'agencement des rues. Ces traversées nécessitent cependant des précautions sur l'isolation électrique des caténaires qui se croisent.

III.9. Conclusion

L'état d'usure des différents constituants de la voie reste dans une fourchette acceptable en regard des sollicitations auxquelles ils sont soumis. Lorsque l'état général d'un des constituants n'est plus satisfaisant et risque d'entraîner un nombre de réparations ponctuelles trop important, l'ensemble des constituants de ce type sera remplacé en totalité. Si tous les constituants de la voie apparaissent en fin de vie, la voie sera remplacée par une voie neuve, ballast, rails et traverses. Cette opération s'appelle Renouvellement Voie Ballast (RVB).

Constituant	Type
Rail	Vignole UIC 60-E1
Traverses	Traverses bi-bloc de type VAX U31
Attaches	Attache à lame de type Nabla
Appareils de voies	UIC 60 de tangente 1/12 UIC 60 de tangente 1/9

Les constituants de la voie.

Les constituants de la voie seront assemblés avec un écartement normale $e=1435$ mm, les appareils des voies et l'épaisseur du ballast sont déterminés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE IV : ETUDE GEOMETRIQUE.

IV.1. Introduction

L'étude géométrique du tracé ferroviaire a pour but d'assurer le bon roulement des trains, il est donc indispensable de trouver la meilleure conception géométrique pour la surface d'études tout en respectant les normes et réglementations de conception ferroviaire.

IV.2. Tracé en plan

Le tracé en plan est une projection orthogonale de l'axe de la voie sur un plan horizontal, il est une succession d'alignements et d'arcs de cercles reliés entre eux par des raccordements progressifs (clothoïdes).

Les caractéristiques des éléments constituant le tracé en plan doivent assurer les conditions de confort et de stabilité. Sans omettre que chaque ligne ferroviaire a deux vitesses caractéristiques :

- Vitesse des trains rapides (voyageurs) $V_R = 160 \text{ km/h}$.
- Vitesse des trains lents (marchandises) $V_m = 80 \text{ km/h}$.

IV.2.1. Conditions et règles à respecter dans le tracé en plan

Pour faire un bon tracé ferroviaire, on doit traiter toutes les données existantes ainsi que respecter quelques exigences, on cite les plus pertinentes :

- Essayer d'utiliser le maximum d'alignements.
- Suivre les courbes de niveau afin de diminuer les terrassements.
- Optimiser les franchissements des oueds pour éviter le maximum d'ouvrages d'art, et cela pour des raisons économiques.
- Eviter les problèmes de talus (stabilité).

IV.2.2. Eléments de tracé en plan

Un tracé en plan est constitué de trois éléments géométriques : alignements droits, arc de cercle et courbes de raccordement.

IV.2.2.1. L'alignement ($R = \infty$)

C'est l'élément le plus simple dans la conception d'une voie ferrée, avoir le maximum d'alignement droits dans une voie ferrée offre un meilleur confort aux usagers ainsi que leur sécurité, donc il est recommandé d'utiliser plus d'alignements droits dans le tracé en plan quand la topographie le permet.

IV.2.2.2. L'arc de cercle ($R = \text{constant}$)

Le raccordement entre deux alignements successifs se fait par un arc de cercle. La valeur du rayon de raccordement est fonction de la vitesse des trains dans la courbure. Les rayons des arcs de cercles et leurs dévers doivent permettre au minimum à un véhicule roulant à la vitesse de référence V_R de ne pas déraper.

IV.2.2.3. La courbe de raccordement

Le raccordement entre l'alignement droit et le cercle de raccordement doit être fait avec des courbes de raccordement progressives. La courbe de raccordement la plus utilisée est la clothoïde dont la courbure est proportionnelle à l'abscisse curviligne ; dont sa nomination comme courbe curviligne.

On utilise ce type de raccordement afin de :

- Introduire progressivement le dévers.

- Concevoir un tracé esthétiquement satisfaisant.
- Respecter les conditions du confort et de sécurité.

IV.2.3. Conditions de raccordement

Les paramètres suivants jouent un rôle important en matière de confort et de coût de maintenance :

- ✓ Excès de dévers.
- ✓ Variation de l'insuffisance de dévers.
- ✓ Longueur des éléments du tracé.

IV.2.4. Paramètres de conception de la voie

Pour assurer la sécurité des usagers ainsi que leur confort, on doit prendre en considération les paramètres suivants :

- Le rayon de la courbe,
- La variation de la courbure,
- L'insuffisance et l'excès de dévers,
- Le dévers et le taux de variation de dévers,
- Longueur des éléments du tracé.

IV.2.4.1. Le dévers

D'après les lois de mécanique classique, un point matériel qui se déplace dans une courbe subit une force centrifuge qui a tendance à le renverser vers l'extérieur.

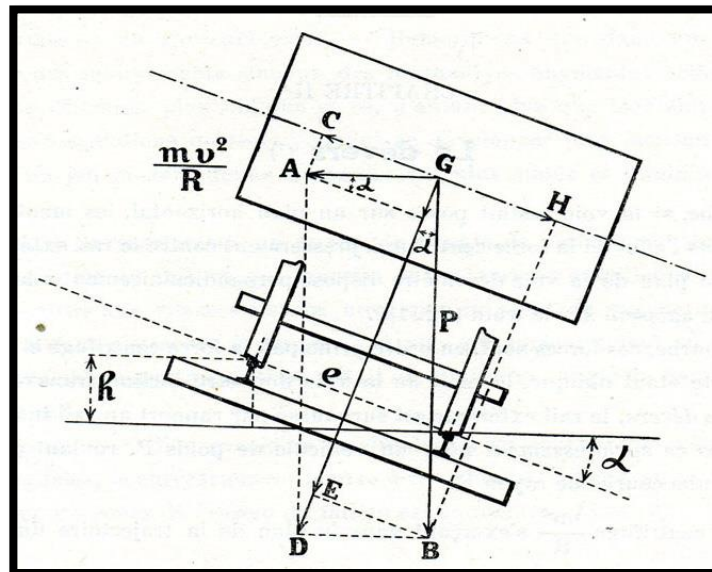


Figure IV.1. Force appliquée par le train en courbe et le dévers correspondant.

Pour modérer ou annuler cette force, un sur élèvement du rail extérieur est appliqué, cette différence de niveau est appelée donc « dévers ».

Le dévers théorique correspondant à une vitesse V et un rayon R est par définition le dévers qui rend nulle l'accélération latérale subie par un véhicule roulant dans une courbe.

Dans une courbe de rayon R , pour une vitesse de roulement V , la force centrifuge F vaut :

$$F = mV^2/R, \tan \alpha = F/P = V^2/Rg$$

On a:

$$h = AD \times \sin \alpha \text{ (}\alpha \text{ très petit, d'où } \sin \alpha \approx \tan \alpha \text{)}$$

$$\text{Donc : } h = AD \times V^2 / Rg \text{ (V en m/s)}$$

$$\text{Pour } AD = 1.5\text{m, } g = 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ et } V(\text{m/s}) = 1/3.6 V(\text{km/h})$$

$$\text{On aura : } h = 0.0118 \times V^2 / R \text{ (h en m, R en m et V en km/h).}$$

$$\text{D'où le dévers théorique } h = d_{th} = 11.8 \times V^2 / R \text{ (}d_{th} \text{ en mm).}$$

IV.2.4.1.1. Le dévers pratique (normal)

Toutefois, le dévers normal est limité à une valeur inférieure à celle du dévers théorique, ce qui produit une insuffisance de dévers (I) pour les trains rapides et un excès (E) de dévers pour les trains lents. C'est pour cela qu'on doit prévoir une valeur moyenne du dévers, qui tient compte de la vitesse des trains rapides et de la vitesse des trains lents.

La valeur du dévers pratique est donc supérieure au dévers théorique des trains lents, et inférieure au dévers théorique des trains rapides :

$$11.8 \times V_R^2 / R - I \leq d_p \leq 11.8 \times V_m^2 / R + E$$

$$\text{La valeur du dévers pratique est donc donnée par la formule : } d_p = 1000 \times \frac{C}{R} \text{ (mm)}$$

Tel que :

$$C = 0.006 V_R^2 ;$$

R : rayon de raccordement

IV.2.4.1.2. Insuffisance du dévers (I)

Lorsque la vitesse du véhicule empruntant une courbe est supérieure à la vitesse d'équilibre correspondant au dévers pratique, une force centrifuge non compensée est appliquée sur ce véhicule. Le dévers de la voie est donc insuffisant et la résultante des forces se déplace vers l'extérieur de la courbe. On appelle insuffisance de dévers la différence entre le dévers pratique et le dévers théorique.

$$I = d_{th} - d_p \text{ (mm)}$$

d_{th} : dévers théorique des trains rapides.

Les valeurs limites de l'insuffisance du dévers sont données par la fiche UIC 703-R et le référentiel SNTF en fonction des vitesses de base :

Tableau IV.1. Valeurs de l'insuffisance du dévers selon la fiche UIC 703-R.

Valeur de I	Normale (mm)	Maximale (mm)	Exceptionnelle (mm)
Selon UIC 703-R	100	120	150
Selon référentiel SNTF	150	160	-

IV.2.4.1.3. Excès de dévers (E)

Lorsque la vitesse du véhicule empruntant une courbe est inférieure à la vitesse d'équilibre correspondant au dévers pratique, ce véhicule est soumis à une force centripète non compensée. Le dévers de la voie est donc excessif et la composante des forces se déplace vers l'intérieur de la courbe. La différence entre le dévers pratique et le dévers théorique des trains lents est appelé donc excès de dévers.

$$E = d_p - d_m(\text{mm})$$

d_m : dévers théorique des trains lents.

Les valeurs limites de l'excès de dévers sont données par la fiche UIC 703-R et référentiel SNTF en fonction des vitesses de base :

Tableau IV.2. Valeurs de l'excès de dévers selon la fiche UIC 703-R.

Valeur de E	Normale (mm)	Maximale (mm)	Exceptionnelle(mm)
Selon UIC 703-R	70	90	110
Selon référentiel SNTF	110	130	-

IV.2.4.2. Valeur minimale des rayons de raccordement dans le tracé en plan

Pour assurer le confort des usagers, une valeur minimale de rayon de raccordement est calculée en fonction des paramètres suivants :

- Vitesse des trains rapides.
- Vitesse des trains lents.
- Excès et insuffisance du dévers.

Le rayon minimale admissible est donc calculé par la formule suivante selon la fiche UIC 703-R :

$$R_{min} = \frac{11.8}{E + I} \times (V_R^2 - V_m^2)$$

Et selon le référentiel SNTF cette valeur est calculée par :

$$R_{min} = \frac{11}{E + I} \times V_R^2$$

Avec :

E : excès de dévers.

I : insuffisance de dévers.

V_R : vitesse des trains rapides.

V_m : vitesse des train lents.

IV.2.4.3. Raccordement de dévers

Le dévers augmente progressivement d'une valeur nulle en alignement, jusqu'au dévers prévu en courbe, cette progression se fait sur une longueur dite rampe de dévers.

La variation du dévers par unité de longueur ou la rampe de raccordement est constante pour faciliter la pose, le contrôle et l'entretien de la voie. Pour passer d'un dévers d'alignement à un dévers de courbe, on surélève progressivement la file extérieure par rapport à la file intérieure et l'insuffisance ou l'excès varie jusqu'à la valeur prévue en plein courbe.

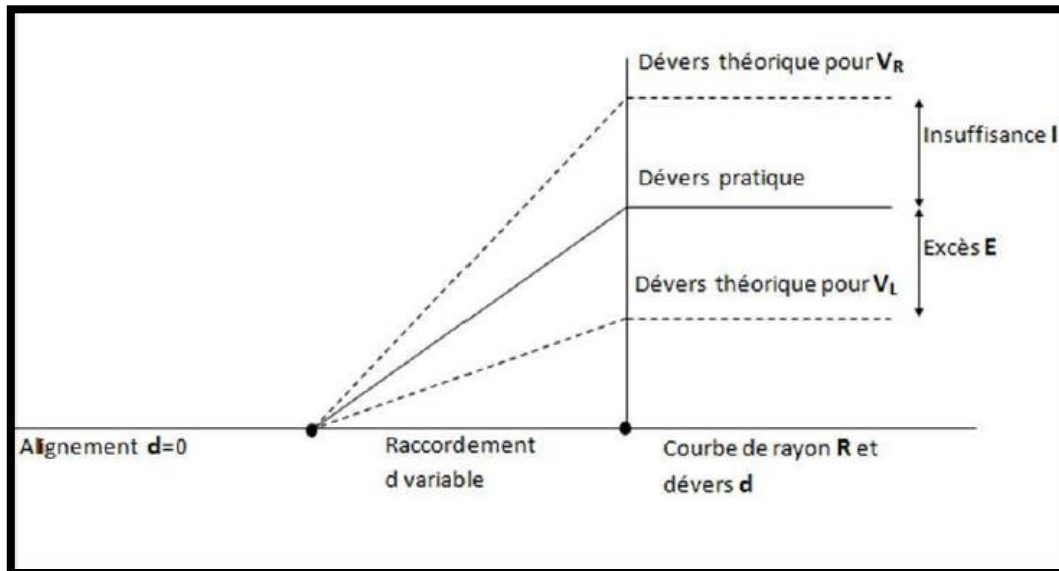


Figure IV.2. Schéma de raccordement de dévers.

IV.2.4.4. Variation du dévers dans une courbe de transition

La variation du dévers le long de la courbe de transition provoque un gauchissement de la voie, donc les points de contact des roues avec les rails ne se trouvent pas au même niveau, et la charge se répartit inégalement sur les roues du véhicule, d'où, sous des charges dynamiques pour des grandes vitesses, le problème s'avère néfaste.

On doit donc limiter la variation du dévers par rapport à la longueur de la courbe de transition.

Le tableau suivant présente les valeurs admissibles de la variation du dévers dans une courbe de transition selon le référentiel SNTF :

Tableau IV.3. Valeurs limites de variation de dévers dans une courbe de transition.

	Variation du dévers (mm/m)
Limite normale	$180/V_R=1.125$
Limite exceptionnelle	$216/V_R=1.35$

IV.2.4.5. Variation de dévers par rapport au temps

Pour une rampe de dévers à pente constante, Une limite de la variation de dévers dans les courbes de transition est nécessaire pour que la vitesse de rotation des véhicules autour d'un axe longitudinal ne nuise pas à leur stabilité. Cette variation est donnée par la formule suivante:

$$\frac{dd}{dt} = \frac{d \times V_R}{3.6 \times L} \text{ (mm/s)}$$

L : longueur de la courbe de transition.

Les valeurs limites de cette variation sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.4. Valeurs limites de la variation de dévers par rapport au temps.

Valeur	Normale	Maximale	Exceptionnelle
dd/dt (mm)	28	35	50

IV.2.4.6. Variation de l'insuffisance de dévers par rapport au temps

Cette limite permet de prendre en considération le fait que l'être humain est plus sensible aux variations d'accélération qu'aux accélérations elles-mêmes.

Sa valeur est donnée par la formule :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I \times V_R}{3.6 \times L} (\text{mm/s})$$

L : longueur de la courbe de transition.

Les valeurs limites de dI/dt sont données par les fiches UIC 703-R et le référentiel SNTF comme suit :

Tableau IV.5. Valeurs limites de la variation d'insuffisance de dévers par rapport au temps.

Valeur dI/dt	Normale (mm)	Maximale(mm)	Exceptionnelle(mm)
Selon fiche UIC	25	70	-
Selon référentiel SNTF	150	160	-

IV.2.4.7. Longueur de la courbe de raccordement

La longueur d'une courbe de transition ou d'un raccordement progressif est défini par les caractéristiques suivantes :

- Taux de variation de dévers en fonction de la longueur.
- Taux de variation de dévers en fonction du temps.
- Taux de variation de l'insuffisance de dévers en fonction du temps.

La longueur minimale de la courbe de raccordement est la valeur maximale des deux longueurs calculées en fonction de dI/dt et dd/dt :

$$L_{dd} = \frac{d_p \times V_R}{3.6 \times dd/dt} ; \quad L_{dI} = \frac{I \times V_R}{3.6 \times dI/dt}$$

IV.2.5. Application au projet

- Calcul du rayon minimal :

$$R_{min} = \frac{11.8}{E + I} (V_R^2 - V_m^2) \rightarrow R_{min} = \frac{11.8}{70 + 100} (160^2 - 80^2) = 1332.7 \text{ m}$$

Pour une circulation à 160 km/h, le rayon minimal calculé par la formule donnée ci-dessus est Rmin=1332.7 m correspondant à un dévers normal 120mm et une insuffisance de dévers normale 100mm.

Le calcul des paramètres géométriques est fait pour un rayon R= 1500m :

$$\text{Le dévers théorique : } d_{th} = \frac{11.8 \times V_R^2}{R_{min}} \rightarrow d_{th} = \frac{11.8 \times 160^2}{1500} = 201.4 \text{ mm}$$

$$\text{Le coefficient de dévers : } C = 0.006 \times V_R^2 = 153.6 \approx 154$$

$$\text{Le dévers pratique : } d_p = 1000 \times C/R \rightarrow d_p = 1000 \times \frac{154}{1500} = 102.4 \text{ mm} < 120 \text{ mm}$$

$$\text{L'insuffisance de dévers : } I = d_{th} - d_p \rightarrow I = 201.4 - 102.4 = 99 \text{ mm} < 100 \text{ mm}$$

$$\text{Le dévers théorique des trains lents : } d_m = \frac{11.8 \times V_m^2}{R_{min}} \rightarrow d_m = \frac{11.8 \times 80^2}{1500} = 55.9 \text{ mm}$$

$$\text{L'excès de dévers : } E = d_p - d_m \rightarrow E = 102.4 - 55.9 = 46.5 \text{ mm} < 70 \text{ mm}$$

$$\text{La longueur de la clothoïde : } L \geq \frac{d_p \times V_R}{3.6 \times \frac{dd}{dt}} \text{ (on calcule L à partir de cette formule car } dd/dt > dI/dt \text{)}$$

$$L \geq \frac{102.4 \times 160}{3.6 \times 28} = 162.53 \text{ d'où } L = 163 \text{ m}$$

Calcul du paramètre de la clothoïde A :

$$\text{Le paramètre de la clothoïde est donné par : } A = \sqrt{R \times L}$$

$$A = \sqrt{R \times L} = \sqrt{1500 \times 163} = 494.46 \text{ m}$$

On calcule par la suite les différents paramètres pour chaque rayon (VR= 160km/h ; Vm=80km/h) :

Tableau IV.6. Valeurs normales des caractéristiques des différentes courbes.

Rayon(m)	dp(mm)	dth(mm)	E(mm)	L(m)	I(mm)	dI/dt(mm/s)	dd/dL(mm/m)	A
1500	102,4	201,4	52,05	162,54	99,0	55,07	0,63	493,8
1600	96	188,8	48,80	152,38	92,8	55,07	0,63	493,8
4000	38,4	75,5	19,52	60,95	37,1	55,07	0,63	493,8

IV.2.6. Calcul de l'axe

Le calcul d'axe consiste à déterminer tous les points de l'axe, en exprimant leur coordonnée ou directions dans un repère fixe. Ce calcul se fait à partir des points dont on connaît les coordonnées, et il doit suivre les étapes suivantes :

- Calcul des gisements,
- Calcul de l'angle γ entre les alignements,
- Calcul de la tangente T,
- Calcul de la corde polaire SL
- Calcul de l'angle polaire τ
- Vérification de non-chevauchement,
- Calcul de l'arc en cercle,
- Calcul des coordonnées de points particuliers,
- Calcul de kilométrage des points particuliers.

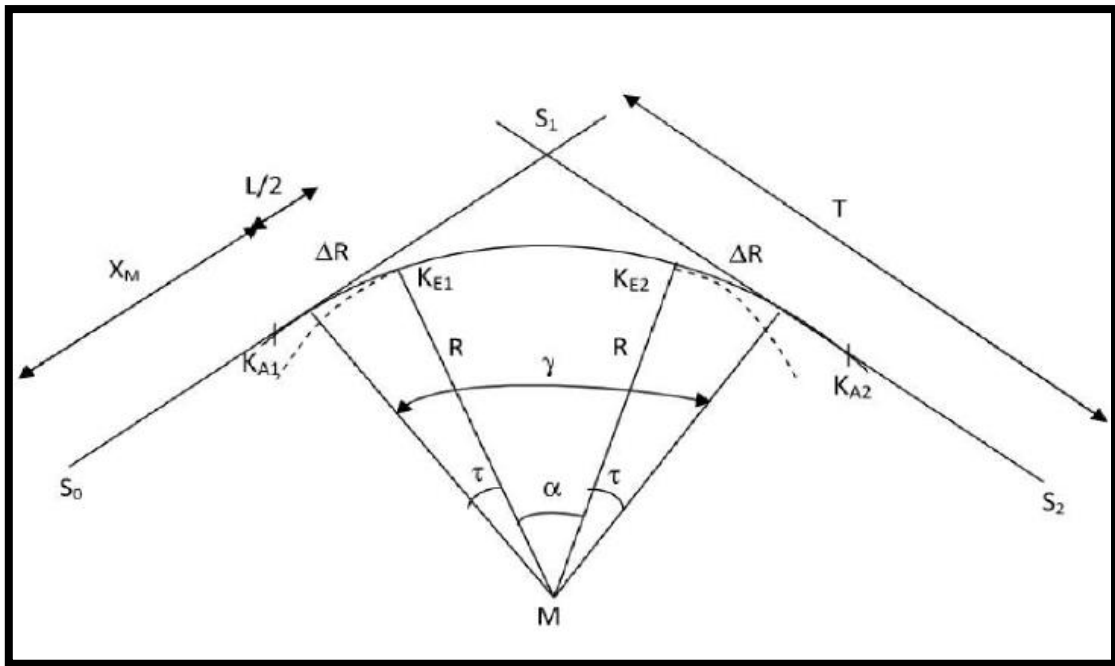


Figure IV.3. Eléments de la clothoïde.

➤ **Calcul des gisements :**

Pour le premier rayon : $R_1 = 1500 \text{ m}$, $A = 493.8$ ———> $L = 200 \text{ m}$.

Tableau IV.7. Coordonnées des points caractéristiques de la clothoïde.

Sommet	X(m)	Y(m)
0	509453,79	3948280,02
1	511888,374	3946780,26
2	513014,087	3946409,87

$$|\Delta X| = |X_1 - X_0| = 2434,5849 \text{ m} ;$$

$$|\Delta Y| = |Y_1 - Y_0| = 1499,7593 \text{ m} ;$$

$$S_0S_1 = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} = \sqrt{2434,5849^2 + 1499,7593^2} ;$$

$$S_0S_1 = 2859,45 \text{ m}.$$

$$|\Delta X_1| = |X_2 - X_1| = 1125,7126 \text{ m} ;$$

$$|\Delta Y_1| = |Y_2 - Y_1| = 370,3882 \text{ m} ;$$

$$S_1S_2 = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} = \sqrt{1125,7126^2 + 370,3882^2} ;$$

$$S_1S_2 = 1185,08 \text{ m}.$$

Donc :

$$GS_0S_1 = 200 + \tan^{-1} \frac{\Delta X}{\Delta Y} = 135.15 \text{ grade.}$$

$$GS_1S_2 = 200 + \tan^{-1} \frac{\Delta X_1}{\Delta Y_1} = 120.24 \text{ grade.}$$

➤ **Calcul de l'angle γ :**

$$\gamma = |G_{S_0}^{S_1} - G_{S_2}^{S_1}| = |135.15 - 120.24| = 14.91 \text{ grade.}$$

➤ **Calcul de l'angle τ :**

$$\tau = \frac{L}{2R} \times \frac{200}{\pi} = \frac{200}{2 \times 1500} \times \frac{200}{\pi}$$

$$\tau = 4.24 \text{ grade.}$$

➤ **Vérification du non chevauchement :**

$$\frac{\gamma}{2} = \frac{14.91}{2} = 7.455 \text{ grade} \quad \text{Et } \tau = 4.24 \text{ grade.}$$

$$\tau < \frac{\gamma}{2} \quad \text{Condition vérifiée, pas de chevauchement.}$$

➤ **Calcul de la tangente T :**

$$T = X_m + (R + \Delta R) \times \tan \frac{\gamma}{2};$$

$$X_m = \frac{L}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ m};$$

$$\Delta R = \frac{L^2}{24R} = \frac{200^2}{24 \times 1500} = 1.11 \text{ m}$$

$$\text{D'où } T = 100 + (1500 + 1.11) \times \tan \frac{14.91}{2}$$

$$T = 276.59 \text{ m.}$$

➤ **Calcul de la distance S_0K_{A1} :**

$$S_0K_{A1} = S_0S_1 - T = 2859.45 - 276.59$$

$$S_0K_{A1} = 2582.86 \text{ m}$$

➤ **Calcul de la corde SL :**

$$SL = \sqrt{X_{KE}^2 + Y_{KE}^2}$$

$$\text{Tel que : } X_{KE} = L = 200 \text{ m et } Y_{KE} = L^2/6R = 4.44 \text{ m}$$

$$\text{D'où : } SL = \sqrt{200^2 + 4.44^2}$$

$$SL = 200.05 \text{ m}$$

➤ **Calcul de l'angle polaire σ :**

$$\sigma = \tan^{-1} \frac{Y_{KE}}{X_{KE}} = \tan^{-1} \frac{4.44}{200} = 1.41 \text{ grade.}$$

➤ **Calcul de l'angle α :**

Etude géométrique.

$$\alpha = \gamma - 2\tau = 14.91 - 2 \times 4.24 ;$$

$$\alpha = 6.43 \text{ grade.}$$

➤ **Calcul de l'arc :**

$$B = K_{E1}K_{E2} = \frac{\pi \times R \times \alpha}{200} = \frac{\pi \times 1500 \times 6.43}{200} = 151.50 \text{ m}$$

➤ **Calcul des coordonnées de chaque point :**

$$K_{A1} \begin{cases} X_{KA1} = X_{S1} - T \sin G_{S1}^{S0} = 511888,374 - 276.59 \times \sin 135.15 \\ Y_{KA1} = Y_{S1} - T \cos G_{S1}^{S0} = 3946780,26 - 276.59 \times \cos 135.15 \end{cases}$$

$$K_{A1} \begin{cases} X_{KA1} = 511652.88 \text{ m} \\ Y_{KA1} = 3946925.33 \text{ m} \end{cases}$$

$$K_{A2} \begin{cases} X_{KA2} = X_{S1} + T \sin G_{S1}^{S1} = 511888,374 + 276.59 \times \sin 120.24 \\ Y_{KA2} = Y_{S1} + T \cos G_{S1}^{S1} = 3946780,26 + 276.59 \times \cos 120.24 \end{cases}$$

$$K_{A2} \begin{cases} X_{KA2} = 512151.10 \text{ m} \\ Y_{KA2} = 3946693.79 \text{ m} \end{cases}$$

$$K_{E1} \begin{cases} X_{KE1} = X_{KA1} + SL \sin(G_{S1}^{S0} - \sigma) = 511652.88 + 200.05 \times \sin(135.15 - 1.41) \\ Y_{KE1} = Y_{KA1} + SL \cos(G_{S1}^{S0} - \sigma) = 3946925.33 + 200.05 \times \cos(135.15 - 1.41) \end{cases}$$

$$K_{E1} \begin{cases} X_{KE1} = 511825.46 \text{ m} \\ Y_{KE1} = 3946824.2 \text{ m} \end{cases}$$

$$K_{E2} \begin{cases} X_{KE2} = X_{KA2} - SL \sin(G_{S1}^{S0} - \sigma) = 512151.10 - 200.05 \times \sin(120.24 - 1.41) \\ Y_{KE2} = Y_{KA2} - SL \cos(G_{S1}^{S0} - \sigma) = 3946693.79 - 200.05 \times \cos(120.24 - 1.41) \end{cases}$$

$$K_{E2} \begin{cases} X_{KE2} = 511959.74 \text{ m} \\ Y_{KE2} = 3946752.10 \text{ m} \end{cases}$$

Les résultats de calcul d'axe manuel sont comparables au calcul numérique obtenu par le logiciel Autocad Civil 3D.

IV.3. Profil en long

Le profil en long d'une voie ferrée est une ligne continue obtenue par l'exécution d'une coupe longitudinale fictive, il est constitué de lignes droites raccordées par des paraboles. Donc il exprime la variation de l'altitude de l'axe de la voie en fonction de l'abscisse curviligne.

Pour chaque point du profil en long on doit déterminer :

- L'altitude de terrain naturel.
- L'altitude de projet.
- La déclivité du projet.

IV.3.1. Constituants du profil en long

Le tracé du profil en long se constitue de :

- **Pentes** : tronçons de voie où l'altitude est décroissante dans le sens de circulation (descente).
- **Rampes** : tronçons de voie où l'altitude est croissante dans le sens de circulation (Montée).
- **Palier** : c'est la partie de la ligne rouge qui se trouve en horizontal.
- **Courbes de raccordement verticales** : des arcs de cercles qui assurent la liaison entre les éléments de la ligne rouge.

IV.3.2. Règles à respecter dans le tracé du profil en long

Pour faire un bon tracé de profil en long, il faut respecter les règles suivantes :

- Les déclivités maximales ne doivent pas être dépassées.
- Respecter les valeurs des rayons préconisés par les règlements.
- Assurer la distance minimale entre deux points de changement de déclivité.
- Rechercher un équilibre entre le volume des remblais et le volume des déblais.
- Eviter les hauteurs excessives en remblai.
- Respecter les pentes nulles dans les gares et zones neutres.

IV.3.3. Déclivités maximales

La déclivité d'une ligne affecte la possibilité de freinage et de démarrage, d'où la déclivité admise varie en fonction de sa longueur.

La déclivité d'une ligne affecte les possibilités de freinage et de démarrage des circulations, la déclivité admissible varie en fonction de sa longueur.

Ce qui suit, sont les valeurs de déclivité maximales en fonction de leurs longueurs, selon le référentiel du SNTF, chapitre 6 'Géométrie de la voie' :

-En déclivité de longueur inférieure à 3 000 m, elle ne doit pas dépasser 16‰ et exceptionnellement 18‰.

-En déclivité de longueur comprise entre 3 000 m et 15 000 m, elle diminue graduellement pour passer de 16‰ à 13‰, exceptionnellement de 18‰ à 15‰.

- En déclivité de longueur supérieure à 15 000 m, la déclivité ne doit pas dépasser 13‰ et exceptionnellement 15‰.

La figure ci-après précise les valeurs de rampes en fonction de la longueur d'application :

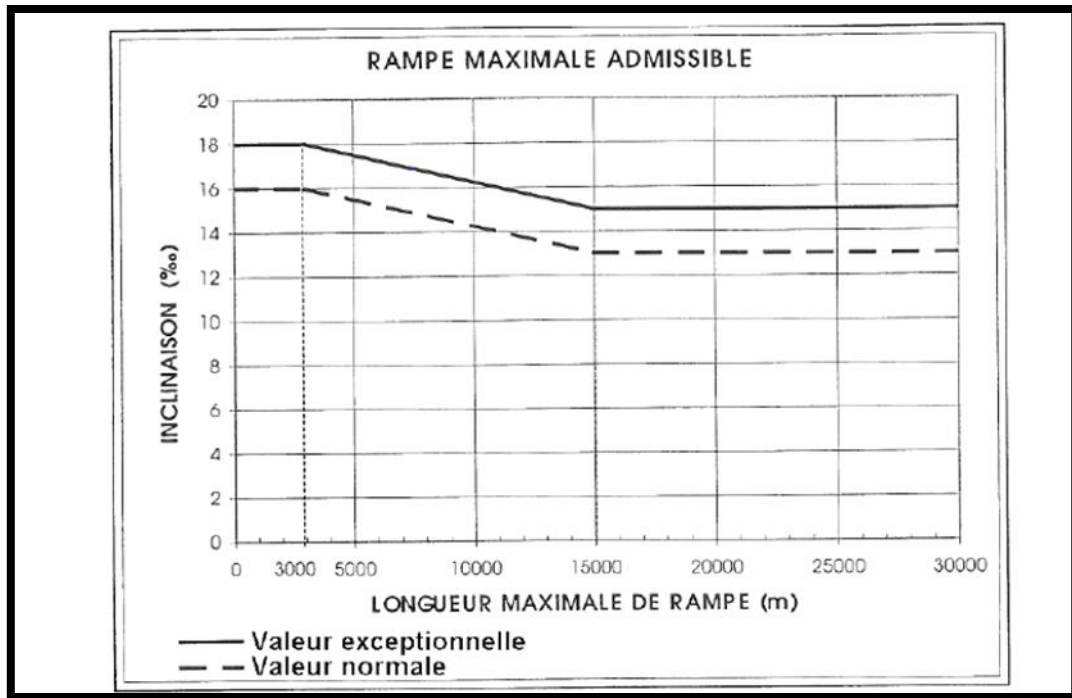


Figure IV.4. Longueur des rampes en fonction de l'inclinaison.

IV.3.4. Rayons minimaux de raccordement en profil en long

La succession de deux déclivités en profil en long nécessite un raccordement circulaire permettant d'assurer le confort et la sécurité en réduisant l'accélération centrifuge due à la vitesse des véhicules. Afin de limiter les accélérations verticales en caisse des véhicules ferroviaires les raccords de déclivité du profil en long doivent respecter les valeurs de rayon suivant (selon référentiel SNTF chapitre 6 'géométrie de la voie') :

Tableau IV.8. Valeurs des rayons verticaux selon référentiel SNTF.

	Valeur de rayon vertical
Limite normale (m)	$0.35 \times V^2 = 10\ 000$
Limite exceptionnelle (m)	$0.25 \times V^2 = 6\ 500$
Points particuliers à des vitesses inférieures (m)	$0.15 \times V^2 = 4\ 000$

IV.3.5. Longueurs minimales des éléments de profil en long

Entre deux accélérations verticales brutales, un temps assez long doit s'écouler afin de permettre à la suspension d'amortir le choc et d'éviter les effets conjugués de plusieurs accélérations rapprochées, sources d'oscillations importantes du véhicule.

La valeur de la longueur de déclivité minimale est donc donnée par (selon référentiel SNTF chapitre 6 'géométrie de la voie') :

Tableau IV.9 : longueurs de déclivité minimales selon le référentiel SNTF.

	Valeur de longueur minimale
Limite normale (m)	$V/2 = 80$

Limite exceptionnelle (m)	$V/2.5 = 64$
Limite minimale	30

IV.3.6. Coordination entre le tracé en plan et le profil en long

Pour assurer le confort des passagers et la bonne conception d'une voie ferrée, il faut assurer une coordination entre le tracé en plan et le profil en long par respecter les conditions suivantes :

- Positionner les points de changement de déclivité en zones de tracé constantes (alignement ou bien ou pleine courbe).
- La superposition d'un rayon vertical avec un raccordement progressif (clothoïde) est interdite.
- En angle rentrant, on doit assurer une grande vitesse pour satisfaire la condition de confort.

Remarque :

Lorsque la différence algébrique entre deux déclivités successives est inférieure à 4‰, un raccordement circulaire n'est pas nécessaire.

IV.3.7. Calcul des éléments de profil en long

Dans ce qui suit on détermine :

- Les coordonnées des points singuliers du raccordement.
- La tangente d'une part et d'autre du sommet.
- La flèche au-dessous de ce dernier.
- Les PK des points singuliers.

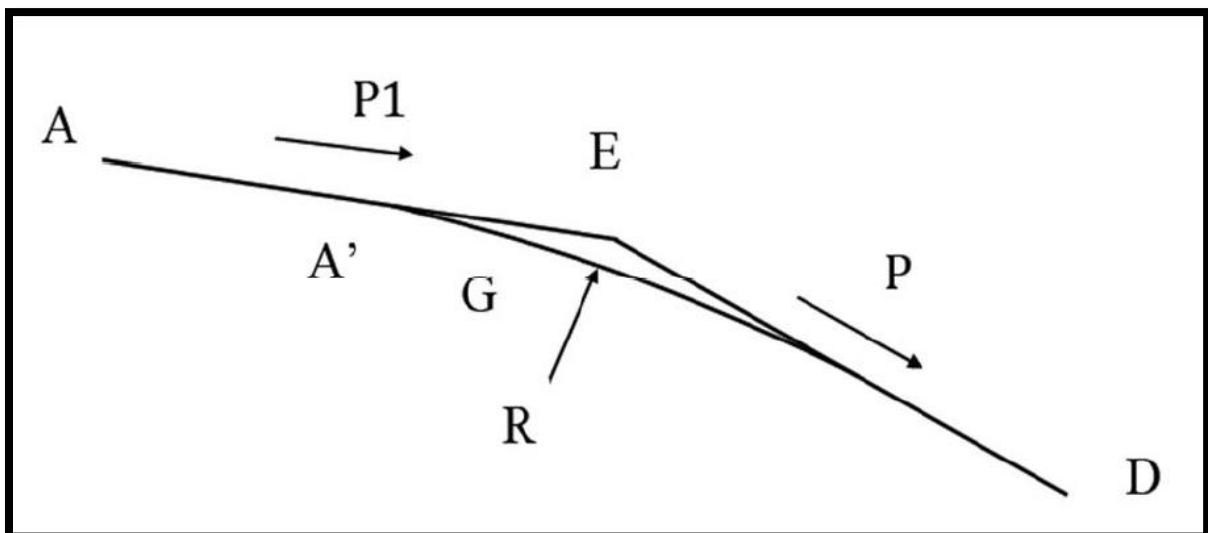


Figure IV.5. Eléments de raccordement de profil en long.

- **A' et B' :** Extrémités du raccordement.
- **T :** Tangente de part et d'autre du sommet.

- **A et B** : deux points connus sur P1 et P2.
- **F** : Hauteur de l'abaissement du sommet (Fleche).
- **(α+β)** : Angle de variation, ou de changement de direction
- **O** : Centre du cercle de rayon R.
- **E** : Sommet ou point de changement de déclivité.
- **L** : Distance entre les deux points A et B.

IV.3.7.1. Exemple de calcul

Tableau IV.10. Coordonnées des points caractéristiques du profil en long.

	S(m)	Z(m)
A	0,000	689,904
E	4867,86	720,178
D	8057,68	744,85

- **Calcul des pentes :**

$$P_1 = \frac{\Delta Z_1}{\Delta S_1} = \frac{689.904 - 720.178}{4867.86} = 6.2 \text{ ‰}$$

$$P_2 = \frac{\Delta Z_2}{\Delta S_2} = \frac{720.178 - 744.85}{8057.68 - 4867.86} = 7.7 \text{ ‰}$$

- **Calcul de la tangente T :**

$$R = 10000 \text{ m ;}$$

$$T = \frac{R}{2} \times (P_2 - P_1) = 7.5 \text{ m}$$

- **Calcul de la flèche F :**

$$F = \frac{T^2}{2R} = \frac{56.25}{2 \times 10000} = 0.003 \text{ m.}$$

- **Calcul de l'altitude du point G (milieu du raccordement) :**

$$Z_G = Z_E - F = 720.178 - 0.003 = 720.175 \text{ m.}$$

- **Calcul des PK et des altitudes des point de début et de fin de raccordement :**

$$A, \begin{cases} PK_{A'} = PK_E - T = 4867.86 - 7.5 \\ Z_{A'} = Z_E - P_1 \times T = 720.178 - 0.0062 \times 7.5 \end{cases}$$

$$A, \begin{cases} PK_{A'} = 4860.36 \\ Z_{A'} = 720.1315 \end{cases}$$

$$B, \begin{cases} PK_{B'} = PK_E + T = 4867.86 + 7.5 \\ Z_{B'} = Z_E - P_2 \times T = 720.178 - 0.0077 \times 7.5 \end{cases}$$

$$B, \begin{cases} PK_{B'} = 4875.35 \\ Z_{B'} = 720.12 \end{cases}$$

Les résultats de calcul manuel du profil en long sont conformes aux résultats obtenus par le logiciel Autocad Civil 3D.

IV.4. Profil en travers

Le profil en travers est une coupe transversale, menée selon un plan vertical perpendiculaire à l'axe de la voie projetée. Le tracé comporte plusieurs profils en travers selon les zones traversées et selon les terrassements effectués pour cela on doit concevoir un profil en travers « type ».

Ce profil type nous renseigne sur les éléments de l'infrastructure, la superstructure, le réseau d'assainissement...

IV.4. Eléments constituant du profil en travers

- **Emprise** : largeur en terrain naturel appartenant au domaine public, affecté à la voie et ses accessoires.
- **Assiette** : c'est la surface du terrain réellement occupée par la voie, elle est limitée par l'intersection du terrain naturel avec les pieds de talus en remblais ou crête de talus en déblais.
- **Plate-forme** : surface du terrain qui comprend la voie et les accotements. Elle se compose de plusieurs couches : couche de ballast, sous couche et une couche de forme.
- **La voie** : partie affectée à la circulation des trains.
- **La berme** : c'est la partie qui contient la piste, permet l'installation des poteaux de signalisations ou caténaires.
- **Dispositifs de drainage** : ceux sont les éléments permettant l'évacuation des eaux pluviales et de ruissellement.

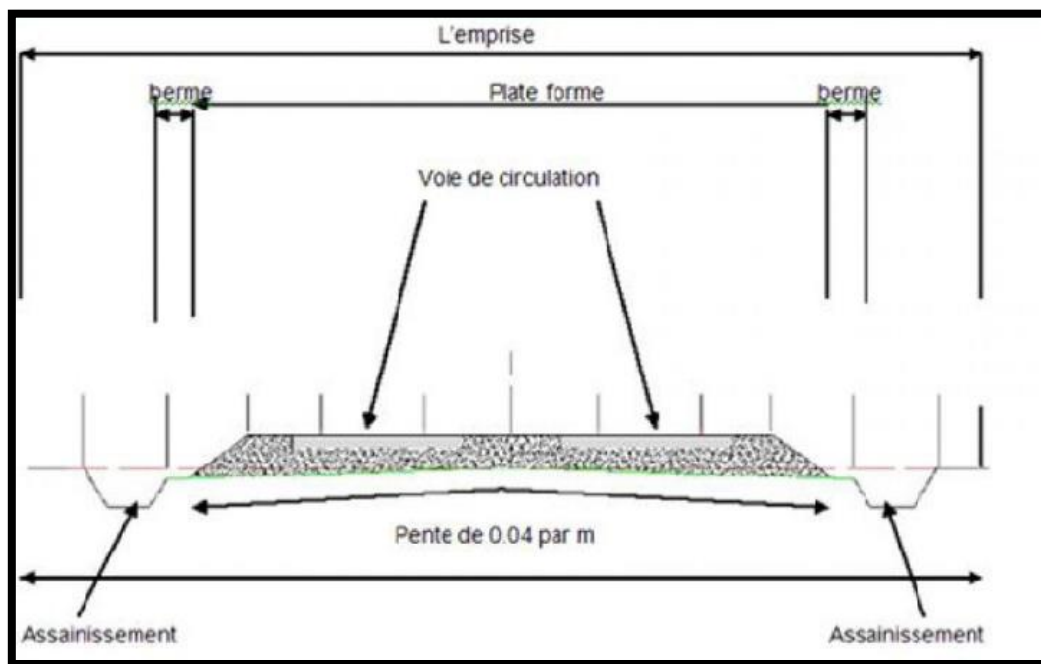


Figure IV.6. Constituants du profil en travers.

IV.5. Conclusion

L'étude de la géométrie d'une voie ferrée est l'une des premières étapes dans sa conception, il est donc nécessaire de faire cette étude selon les normes et règlements existants, et ceci pour assurer son fonctionnement, et garantir un niveau de confort pour les voyageurs.

CHAPITRE V : ETUDE GEOTECHNIQUE.

V.1. Introduction

L'étude géotechnique est un intervenant très important dans l'étude d'une voie ferrée, elle a pour but l'identification des différents types de sols traversés, ainsi que les sous-sols et ceci pour assurer la stabilité de cet ouvrage.

V.2. Géologie du couloir d'étude

Après avoir tracé la ligne ferroviaire, et en consultant les cartes géologiques de la région, on peut avoir une idée générale sur les différentes couches de sols qu'on peut trouver sur site.

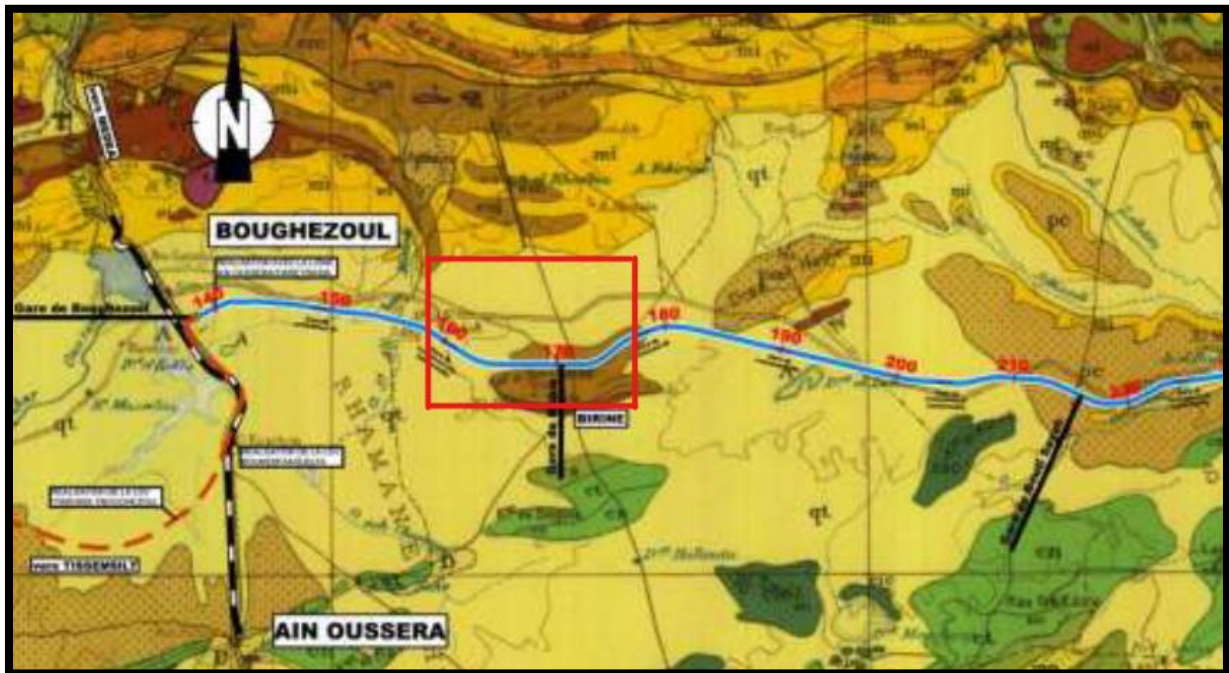


Figure V.1. Extrait de la carte géologique de l'Algérie au 1/500000 avec tracé de la ligne de chemin de fer M'sila-Boughezzoul.

La consultation des différentes cartes et coupes géologiques de cette région, nous a permis d'identifier deux unités géotechniques principales, avec des alluvions récents (A) :

- Des encroutements calcaires en carapace, avec des sables peu limoneux carbonaté parfois à graves encroûté (Qt) : Du PK160+000 au PK164+800 et du PK167+750 au PK171+000.
- Barres de calcaire du Lutétien (E) : Du PK164+800 au PK167+750.

Pour connaître les caractéristiques de chaque unité, des essais in-situ ainsi que des essais au laboratoire ont été réalisés.

V.3. Programme géotechnique :

Les travaux suivants ont été réalisés :

- Reconnaissance de surface.
- Sondages mécaniques.
- Puits de reconnaissance.
- Essais de pénétration standard SPT.

- Essais de laboratoire sur les échantillons originaires des puits et des sondages.

V.4. Puits de reconnaissance

Les puits de reconnaissance ont eu pour but d'observer, directement en profondeur, la nature des formations présentes, d'évaluer l'épaisseur des sols de mauvaise qualité à décaper, de déterminer l'épaisseur de terre végétale, de détecter le niveau d'eau et, enfin, de prélever des échantillons remaniés, pour l'identification et la caractérisation géotechnique en laboratoire.

Les résultats des puits de reconnaissance réalisés dans de différents points kilométriques et de potentielles régions d'emprunt sont présentés comme suit :

Tableau V.1. Résultats des puits de reconnaissance.

Puit n°	Localisation PK	Profondeur de collecte d'échantillon (m)	Profondeur maximale (m)	Formation géologique	Profondeur (m)	Nature lithologique
P 14-3	160+280	0.8-1.3	2.2	Qt	0.0-0.5	Terre végétale
					0.5-1.5	Sable fin à bloc de calcaire
					1.5-2.2	Sable fin à encroûtements calcaires, présentant des cristaux de gypse
					Le puit est arrêté à 2,2m (présence d'une croûte calcaire très dure empêchant l'avancement)	
P 15-3	164+100	1.6-1.9	3.0	Qt	0.0-0.7	Sable à traces de racines
					0.7-3.0	Sable fin carbonatée, peu limoneux à grave fine à moyenne parfois grossière, encroûté (à niveaux de croûte calcaire)
P 16-3	167+025	0.8-1.2	2.5	E	0.0-0.5	Sable à traces de racines
					0.5-2.5	Sable fin carbonaté, peu limoneux à grave fine à moyenne parfois grossière, encroûté (à niveaux de croûte calcaire)
					Le puit est arrêté à 2,5m (présence d'une croûte calcaire très dure empêchant l'avancement)	
P 17-3	168+040	1.6-1.9	3.0	Qt	0.0-0.6	Sable à traces de racines
					0.6-3.0	Sable fin carbonaté, peu limoneux, à grave fine à moyenne à quelques éléments caillouteux (<5cm) encroûté
					0.0-0.5	Sable fin à quelques éléments graveleux fin, à traces de racines
						Sable fin carbonaté, peu limoneux, à grave fine à

P 18-3	168+616	1.5-1.9	3.0	Qt	0.5-3.0	moyenne, encroûté (parfois en niveaux de croûte calcaires centimétrique)
P 19-3	168+802	1.2-1.8	3.0	Qt	0.0-0.2	Terre végétale
					0.2-0.9	Sable fin à grave fine à moyenne, encroûté
					0.9-3.0	Sable fin, carbonaté, peu limoneux, légèrement encroûté, à quelques éléments graveleux

V.5. Sondages carottés

Le sondage est un forage vertical de petit diamètre réalisé dans le sol pour la récupération des échantillons qui sont utilisés pour :

- L'identification visuelle
- L'identification mécanique in situ
- L'identification physique en laboratoire : granulométrie, teneur en eau, argilosité, etc.
- L'identification mécanique en laboratoire : angle de frottement, cohésion, etc.

Les sondages ont été réalisés aux lieux des moyens/grands déblais, afin d'étudier les conditions d'excavation, la stabilité des pentes de talus et de permettre l'identification de la nature des différents matériaux traversés envisageant leur réutilisation en remblai, PST et CDF et des moyens/grands remblais, afin définir le profil géologique et d'étudier les conditions d'assise.

Dans ce qui suit, des exemples des résultats des sondages carottés le long du tracé ferroviaire :

Tableau V.2. Résultats des sondages carottés.

Sondage n°	Localisation (PK)	Formation géologique	Profondeur maximale (m)	Niveau d'eau (m)	Nature géologique	
S7-3	170+173	Qt et A	12.3	Eboulement à 10m	0.0-0.4	Sable fin peu graveleux à traces de racines
					0.4-0.8	Graves généralement fine à moyenne, à quelques éléments caillouteux
					0.8-3.5	Limon légèrement encroûté, à graves fines à moyennes entre 2,2 et 3,55m, parfois sableux
					3.5-5.6	Sable fin peu limoneux à traces de concrétions carbonatées, à fragments graveleux et caillouteux de nature calcaire entre 4,0 et 5,65m
					5.6-7.1	Graves généralement fines à moyenne, à sable grossier et présence de cailloux
					7.1-9.0	Limon sableux peu consistant.

					9.0-12.3	Limon sableux à fragments calcaires
S6-3	167+300	E	16.6	Non détecté	0.0-0.4	Sable fin, à quelques traces de racines
					0.4-16.6	Calcaire dur, peu à très peu fracturé, à passage fracturé entre 3,1 et 4,6m, à subverticale parfois à calcite recristallisée, à niveau des plans de fracturation.

V.5.1. Interprétation des résultats

Les sondages carottés ont permis d'extraire les informations suivantes :

➤ Unité quaternaire (Qt) :

Les sondages effectués dans cette formation géologique ont permis d'identifier l'alternance des couches constituées par des limons sableux encroûtés à graves fines à moyennes, sables peu limoneux avec traces de concrétions carbonatées avec fragments graveleux et caillouteux de nature calcaire, et couches de graves généralement fines à moyennes, avec sable grossier et présence de cailloux.

➤ Unité quaternaire (A) :

Cette formation est constituée par des argiles limono-sableuses molles avec traces de matières organiques et sables limoneux, parfois graveleux et de couleur brunâtre.

➤ Unité éocène (E) :

Les sondages effectués dans cette formation géologique ont permis d'identifier des couches, essentiellement, calcaires dures, de couleur blanchâtre, de grès fin tendre avec traces d'oxydation au plan de fracture et, parfois, de sable fin carbonaté grésifié.

V.6. Essais in-situ

Le but de ces essais est de compléter ou même de remplacer les essais sur échantillons intacts en laboratoire pour déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques des sols avec d'avantage de précision. Ils sont surtout utilisés dans les terrains très hétérogènes ou très incohérents quand les carottes prélevées sont trop modifiées.

V.6.1. Essais SPT (Standard penetration test)

L'essai de pénétration standard est probablement l'essai le plus utilisé en géotechnique pour la caractérisation des sols sableux. Il consiste en l'enfoncement par battage d'une cuillère normalisée (cuillère fendue) attachée à l'extrémité inférieure des tiges. « Le marteau (63,5 kg) et de hauteur de chute (762 mm). « Normalisé ».

La majorité des sondages carottés exécutés a été accompagnée de la réalisation d'essais de pénétration du type SPT (« Standard Pénétration Test »).

La compacité des sols traversés est donnée en fonction du nombre de coups nécessaire à l'enfoncement.

Tableau V.3. Compacité des sables.

N_{SPT}	Compacité
0-4	Très peu compact
4-10	Peu compact
10-30	Moyennement compact
30-50	Compact
>50	Très compact

Les résultats de l'essais de pénétration standard dans les sols sableux sont comme suit :

- Formation géologique éocène (E) :

Dans les couches de sables fins, parfois grésifiés, et de grès fins tendres de la formation (E), les valeurs obtenues dans les essais SPT sont supérieures à 60 coupes, ce qui correspond à des terrains très compacts.

- Formation géologique quaternaire (Qt) :

Dans les couches de nature limono-sableuse et sablo-graveleuse de la formation quaternaire (Qt), les valeurs obtenues dans les essais SPT sont comprises entre 17 et 37 coupes ($N1+2$), ce qui correspond à un terrain moyennement compact à compact.

V.7. Essais au laboratoire

Dans le but de caractériser les sols des formations existantes le long du tracé, plusieurs essais de laboratoire ont été réalisés sur des échantillons prélevés dans les puits de reconnaissance (échantillons remaniés) et les sondages (échantillons intacts).

Les essais ont été effectués sur des échantillons représentatifs après identification visuelle.

V.7.1. Echantillons remaniés

L'exécution des puits de reconnaissance a permis l'obtention d'une importante quantité d'échantillons remaniés qui ont fait l'objet d'une caractérisation de laboratoire à travers la réalisation de plusieurs essais géotechniques.

La caractérisation de laboratoire a compris les essais suivants :

- Analyse granulométrique (AG).
- Limites d'Atterberg (WL - limite de liquidité et Wp - limite de plasticité).
- Teneur en eau naturelle (W).
- Essais au bleu (VBS).
- Equivalente de sable (ES).
- Essais Proctor (normal et modifié).
- Essai CBR.

V.7.2. Echantillons intacts

L'exécution des sondages a permis l'obtention d'une importante quantité d'échantillons intacts qu'ont fait l'objet d'une caractérisation de laboratoire à travers la réalisation de plusieurs essais géotechniques.

La caractérisation au laboratoire des échantillons intacts a compris deux types d'essais : essais en sol et essais en roche.

V.6.2.1. Essais en sols

Les essais sur sols sont classifiés en deux parties ; essais physiques et essais mécaniques.

➤ Essais physiques :

- Analyse granulométrique (AG);
- Limites d'Atterberg (WL - limite de liquidité et Wp - limite de plasticité);
- Teneur en eau naturelle (W);
- Essais au bleu (VBS);

➤ Analyse chimique :

Des essais permettant de déterminer le pourcentage de sulfates (SO₄-), chlorures (Cl-) et de carbonates (CaCO₃) ont été effectués.

➤ Essais mécaniques :

- Essais de cisaillement rectiligne à long terme du type CU.
- Essais de compressibilité à l'œdomètre pour la caractérisation de la déformabilité ;
- Essais de compression simple pour la caractérisation mécanique des matériaux.

V.6.2.2. Essais en roche

Les essais effectués sur les matériaux rocheux traversés sont les suivants :

- Coefficient de fragmentabilité.
- Coefficient de dégradabilité.
- Essais Micro Deval humide.
- Essais Los Angeles.
- Résistance à la compression uni-axiale sèche.
- Résistance à la compression uni-axiale saturée, Rc (Bars).

V.8. Résultats des essais

Formation quaternaire (Qt) :

Ces dépôts sont composés par : des croutes calcaires très dures, sables carbonatés peu limoneux encroutés à fragments graveleux et caillouteux de nature calcaire ; les essais réalisés sur cette formation ont donné les résultats suivants :

- Le pourcentage des matériaux fins (<80 μ) varie entre 17% et 51%.
- Cette formation présente des teneurs en eau faibles (6% à 11%).
- Les fractions fines sont peu à moyennement plastiques (indice de plasticité varie de 5 à 23%), avec quelques échantillons présentant une plasticité importante (25%).
- Les densités sèches maximales obtenues par les essais Proctor et Proctor modifié sont de l'ordre 1.59 T/m³ et 1.79 T/m³ respectivement.
- Cette formation présente un indice CBR_{95%} de l'ordre de 12%.

En se basant sur les résultats de l'étude géotechnique, les sols de cette formation peuvent être classifiés en C1B5, B5, A1 et A2 selon la classification SETRA-LCPC, et sont de classe de portance QS1(sols médiocres acceptables) selon la classification UIC.

Formation éocène (E) :

Cette formation est composée par des : calcaires dures, croutes calcaires, sables fins carbonatés grésifié et grés fins tendre ; les essais réalisés peuvent être classifiés en deux types

différents : essais en matériaux meubles et essais en matériaux rocheux. Les résultats sont comme suit :

- En matériaux meubles :
 - Le pourcentage des matériaux fins ($<80\mu$) varie entre 24% et 28%.
 - Ces matériaux présentent une teneur en eau faible (8%).
 - Les fractions fines sont peu à moyennement plastiques (indice de plasticité varie de 7 à 11%).
 - Les densités sèches maximales obtenues par les essais Proctor et Proctor modifié sont de l'ordre de 1.64 T/m^3 et 1.75 T/m^3 respectivement.
 - Indice $\text{CBR}_{95\%}$ de l'ordre de 22%.
- En matériaux rocheux :
 - Les matériaux rocheux traversés sont peu dégradables (coefficient de dégradabilité de l'ordre de 1.03%)
 - La résistance à la fragmentation est bonne à moyenne (Los Angeles de 20 à 29).
 - La résistance à l'usure est médiocre (valeur MDE de 35 à 52).
 - Les matériaux présentent une résistance à la compression uni-axiale sèche de l'ordre de 500 bars et une résistance à la compression uni-axiale saturé de l'ordre de 300 bars.

En se basant sur les résultats de l'étude géotechnique, les sols de cette formation peuvent être classifiés en R21 selon la classification SETRA-LCPC, et sont de classe de portance QS1(du PK 164+800 au PK 166+900) et QS2(du PK 166+900 au PK167+750) (sols médiocres acceptables à moyens) selon la classification UIC.

Dans ce qui suit, les résultats des essais en laboratoire sur les matériaux meubles et les matériaux rocheux :

Tableau V.4. Aperçu des résultats des essais physiques et mécaniques sur les matériaux rocheux.

Formation géologique	Lithologie	Pourcentage des matériaux fins (%<80 μ)	Limites d'Atterberg		Teneur en eau naturelle ω_n (%)	VBS (g/100g)	Proctor Normal		Proctor modifié		CBR _{95%}	Cisaillement recligne		Résistance à la compression simple, Rc (Bars)
			Limite de liquidité LL (%)	Indice de plasticité IP (%)			ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (T/m ³)	ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (T/m ³)		C_u (Bars)	Φ (°)	
Qt	Croutes calcaires très dures, sables carbonatés peu limoneux encroutés à fragments graveleux et caillouteux de nature calcaire	17-51	21-46	5-23	6-11	0.27-2.43	17-23	1.47-1.71	10-17	1.71-1.87	12-13	0.25	27	-
E	Calcaires dures, croutes calcaires, sables fins carbonatés grésifié et grés fin tendre	25-35	24-28	7-11	8	0.29-1.46	18	1.64	15	1.75	22	-	-	47

Tableau V.5. Aperçu des résultats des essais physiques et mécaniques sur les matériaux rocheux.

Formation géologique	Lithologie	Coefficient de fragmentabilité	Coefficient de dégradabilité	Los Angeles (%)	Micro Deval Humide (%)	Résistance à la compression uni-axiale sèche (Bars)	Résistance à la compression uni-axiale humide (Bars)
E	Calcaires dures, croutes calcaires, sables fins carbonatés grésifié et grés fin tendre	1.01-1.1	1.0-1.07	20-29	35-52	441-877	278-621

V.9. Conclusion

L'étude géotechnique sur les différents sols traversés par la ligne ferroviaire nous a permis de classer les unités géologiques de la région et déduire la classe de portance de celles-ci :

Tableau V.6. Classes de portance de la région

PK début	PK fin	Unité géologique	Classification du sol
160+000	164+800	Qt	QS1
164+800	166+900	E	QS1
166+900	167+750	E	QS2
167+750	171+000	Qt	QS1

CHAPITRE VI : TERRASSEMENT ET STRUCTURE D'ASSISE.

VI.1. Introduction

L'infrastructure de la voie ferrée où la structure d'assise, est la partie inférieure sur laquelle cette voie repose, elle sert à répartir sur la plate-forme, les charges exercées par le passage des trains sur le sol support.

VI.2. Terrassements

Les travaux de terrassement sont les travaux consistant à faire bouger les terres d'une manière adéquate pour répondre aux charges de trafic prévues et différentes charges dynamiques.

VI.2.1. Déblais

Les contraintes topographiques et géotechniques d'implantation du tracé de la ligne ferroviaire du projet dans les zones de relief nivelé induisent la nécessité d'exécution de terrassements de petit à moyenne magnitude.

L'occurrence superficielle de terrains avec moyennes à faibles caractéristiques géomécaniques, entraîne la prise en considération d'un ensemble de solutions et dispositions constructives pour la minimisation des problèmes de stabilité des talus à long terme.

VI.2.1.1. Pente de talus

L'inclinaison des talus de déblais a été définie en fonction de plusieurs aspects : la hauteur des déblais, les respectives caractéristiques géomécaniques, une adéquate intégration paysagère et des contraintes du tracé, notamment en ce qui concerne le bilan des terrassements.

Vu que la plupart des déblais n'auront pas des hauteurs très significatives et compte tenu du profil géologique des terrains, on retient une pente de 1,5H : 1V.

VI.2.1.2. Réutilisation des matériaux et gites d'emprunt

D'après les résultats de l'étude géotechnique réalisée sur les sols traversés, et après la recherche des différentes zone potentielles d'emprunt, les matériaux déblayés et les matériaux extraits des gites d'emprunt peuvent être réutilisés en remblais mais sous conditions, et ceci en se basant sur le GTR (Guide des Terrassements Routiers).

Dans le tableau qui suit, le taux de réutilisation des matériaux déblayés selon leurs formation géologique :

Tableau VI.1 : taux de réutilisation des matériaux déblayés.

Formation géologique	Taux de réutilisation	Possibilité de réutilisation en
E	100%	Remblais, couche de forme et PST (partie supérieure de terrassement).
Qt	90%	Remblais, couche de forme et PST (partie supérieure de terrassement).

Les matériaux récupérés des déblais ne seront pas suffisants, d'où le besoin d'utiliser les matériaux provenant des gites d'emprunt.

Les gites d'emprunt adjacents au projet sont principalement de formation quaternaire Qt, les matériaux excavés de celles-ci, peuvent être réutilisés en remblais, couche de forme et partie supérieure des terrassements.

Tableau VI.2 localisation des gites d'emprunt et la possibilité de leur réutilisation.

Désignation de l'excavation	Localisation (PK)	Classification		Réutilisation
		LCPC	UIC	
E12	162+700 au 165+100	C1B5	QS1	Remblais, CDF, PST
E13	168+000 au 168+800	C1B5	QS1	Remblais, CDF, PST
E14	170+700 au 171+000	C1B5	QS1	Remblais, CDF, PST

Le ballast qui sera utilisé dans ce projet provient du gisement de Sour El Ghazlane-El Hachimia.

VI.2.2. Remblais

Les principaux remblais au niveau du tracé présentent, en général, des hauteurs comprises entre 4 et 6 m, les hauteurs maximales atteintes étant 7m.

VI.2.2.1. Pente de talus

Compte tenu des caractéristiques des matériaux disponibles pour la construction des remblais et la nature des terrains de fondation, on préconise l'adoption d'une pente générale de 1,5H : 1V. L'inclinaison adoptée pour les talus de remblai a été définie aussi en fonction d'une adéquate intégration paysagère, des contraintes du tracé et des matériaux disponibles.

Dans les remblais avec des hauteurs supérieures à 5-6 m, les talus devront être plus conservatifs et la pente sera de 2H : 1V. Cette inclinaison permettra un meilleur comportement à long terme et une plus grande résistance à l'érosion de surface du remblai.

VI.3. Structure d'assise

Les différentes couches de la structure d'assise permettent par leur nature et leur épaisseur le bon comportement de la voie ferrée du point de vue rigidité, tenue et drainage. Les couches d'assise comprennent une couche de ballast et une sous couche d'adaptation interposée entre le ballast et la plateforme.

L'épaisseur et la nature des couches d'assise dépendent de plusieurs paramètres :

- Les caractéristiques globales et intrinsèques des sols de plate-forme.
- Les conditions climatiques du site.
- Le trafic (tonnage, charges, vitesses).
- L'armement (profil des rails, nature et espacement des traverses).

VI.3.1. Le ballast

On appelle ballast le lit de pierres ou de graviers sur lequel reposent les rails et les traverses. Il est constitué par un granulat de diamètre 25/50 mm résultat du concassage des roches extraites de carrières de pierres dures (granit, porphyre, grès, gneiss...).

Les éléments du ballast doivent s'imbriquer, de façon à former une masse compacte, mais perméable. Les traverses sont enchâssées dans le ballast, ce qui assure la fixité de la voie.

VI.3.2. La sous-couche

C'est une couche d'adaptation interposée entre le ballast et la plate-forme, cette sous-couche a une pente transversale de 3% à 5%, elle peut être conçue en mono couche ou multiples couches, et ceci selon la nature de la plateforme.

La sous-couche répond aux besoins suivants :

- Protection de la partie supérieure de la plate-forme contre l'érosion qui résulte d'une part, du poinçonnement opéré par les éléments de ballast et d'autre part, de l'action des eaux zénithales.
- Protection la plateforme contre les effets du gel.
- Meilleure répartition des chargements.

Pour notre projet, nous adapterons une pente transversale de 4%.

VI.3.3. Plateforme

C'est la partie supérieure qui supporte la sous-couche de ballast, elle est composée de terres rapportées dans le cas des remblais, ou du sol en place compacté à 100% dans le cas des déblais.

De l'analyse de la reconnaissance géologique de surface et des résultats des travaux d'investigation réalisés, la plateforme ferroviaire interfère avec un terrain caractérisé par une importante hétérogénéité au niveau lithologique, composé par des formations de nature différente.

En vertu des résultats des travaux de reconnaissance et des essais au laboratoire analysés, les sols présents au niveau de l'arase des terrassements s'encadrent principalement dans la classe d'arase S1 (QS1).

On distingue trois classes de portance de la plateforme dépendant de la qualité du sol constituant, et de l'épaisseur et qualité de la couche de forme si elle existe :

- P1 : plateforme médiocre.
- P2 : plateforme moyenne.
- P3 : plateforme bonne.

Il est exigé par le maître d'ouvrage que la plateforme ait une classe de portance P3, de qualité QS3, on prend donc une épaisseur minimale de couche de forme égale à 0.50 m.

Tableau VI.3 . Épaisseur et qualité envisagé pour la couche de forme.

Classe de qualité du sol support	Classe de portance envisagée pour la plateforme	Classe de couche de forme à mettre en œuvre pour obtenir la classe de portance envisagée.	
		Qualité	Epaisseur minimale (m).
QS1	P1	QS1	-
	P2	QS2	0.5
	P2	QS3	0.35
	P3	QS3	0.5
QS2	P2	QS2	-
	P3	QS3	0.35
QS3	P3	QS3	-

VI.3.4. Dimensionnement de la couche d'assise 'ballast + sous-couche'

Le dimensionnement du profil en travers type se fait en se basant sur plusieurs paramètres : la portance du sol support, la classification de la voie, la vitesse des trains rapides et train de transport de marchandise. L'épaisseur totale de la structure de notre plateforme ferroviaire se donne par :

$$e=E+a+b+c+d+f+g$$

Tel que:

E: épaisseur de la couche de forme pour obtenir la classe de portance, elle dépend de la classe de qualité du sol.

a : coefficient dépendant du groupe de la ligne ferroviaire.

b : coefficient dépendant du type de traverses (en bois, béton).

c : coefficient dépendant des conditions de base.

d : coefficient dépendant de la charge apporté par le train.

f : coefficient dépendant de la vitesse de base et classe de la plateforme.

g : coefficient dépendant de la présence des géotextiles.

Valeur de a :

- a = 0 m : lignes de groupe UIC 1 et 2, $V > 160$ km/h
- a = 0,05 m : lignes de groupe UIC 3.
- a = 0,1 m : lignes de groupe UIC 4, 5,6 et 7, 8,9 avec voyageurs
- a = 0,15 m : lignes de groupe UIC 7, 8,9 sans voyageurs

Valeur de b :

- b = 0 m : traverses bois de longueur $L=2.60$ m
- $b = (2.5-L)/2$: traverses en béton de longueur L (b et L en (m), $b < 0$ si $L > 2.5$ m)

Valeurs de C :

- c = 0 m: dimensionnement normal
- c = 0.1 m: lignes de groupe UIC 7, 8,9 sans voyageurs, et pour les voies de service de catégorie B, C.

Valeurs de d :

- d = 0 m : si la charge nominale maximale d'essieu ≤ 200 KN
- d = 0,05 m : si la charge nominale maximale d'essieu = 225 KN
- d = 0,12 m : si la charge nominale maximale d'essieu = 250 KN
- d = 0,35 m : si la charge nominale maximale d'essieu = 300 KN

Valeur de f :

- f = 0 m : pour toutes les lignes parcourues à une vitesse ≤ 160 km/h et pour la plateforme de classe de portance P3 des lignes quelles que soit la vitesse.
- f = 0,5 : pour toutes les plates-formes de classe de portance P2 ou bien des lignes parcourues a grande vitesse $V > 160$ km/h.
- f = 0,10 m : pour toutes les plates-formes de classe de portance P1.

Valeur de g :

- g = + présence de géotextiles lorsque la couche de forme est en sol QS1 ou QS2.

- $g = 0$ pas de géotextile lorsque la couche de forme est en sol QS3.

Tableau VI.4 . Caractéristiques de la voie.

Paramètre	En pleine voie et en gare	
	Description	Valeur (m)
E	Plateforme de classe P3	0.5
a	Groupe UIC 4	-0.05
b	Traverses bi-blocs VAX U31	0.13
c	Dimensionnement normal	0.00
d	Charge pour essieu 200kN	0.00
f	Vitesse $\leq 160\text{km/h}$	0.00
g	Pas de géotextile	0.00
e	-	0.55
Ballast	-	0.3
Sous-couche	-	0.25
Couche de forme	-	0.5

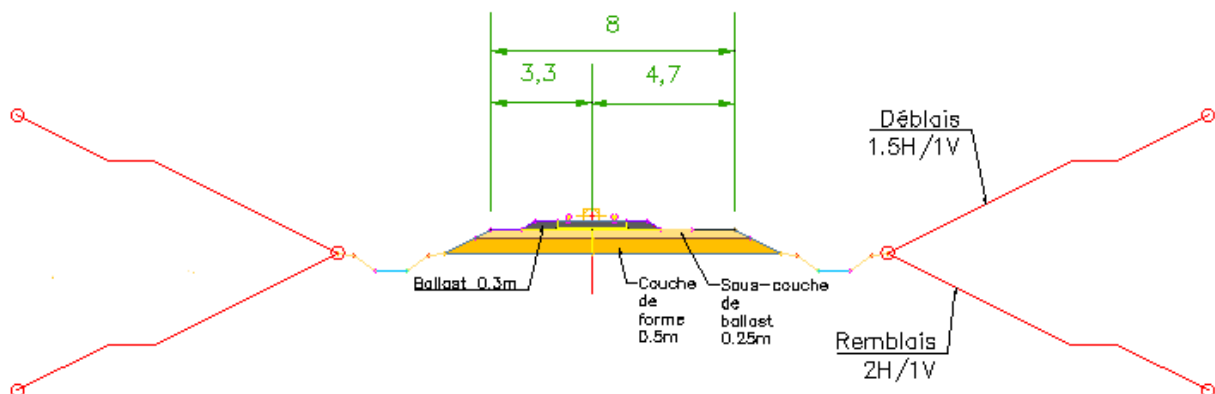


Figure VI.1. dessin du profil en travers type.

VI.3.5. Calcul des épaisseurs de la superstructure et infrastructure

Après avoir dimensionné la structure d'assise, il est nécessaire de préciser les épaisseurs de la superstructure et de l'infrastructure en fonction des composantes de notre voie et notre couche d'assise :

- Couche de ballast : 30 cm.
- Sous-couche de ballast : 25 cm.
- Couche de forme : 50cm.
- Rail de type 60E1 ayant une hauteur de : 17.2 cm.
- Traverse bi-bloc VAX U31 avec une hauteur sous rail de 22 cm.

- Semelle en élastomère :0.9 cm.

D'où :

Epaisseur de l'infrastructure : $25+50=75$ cm.

Epaisseur de la superstructure : $30+17.2+22+0.9=70.1$ cm.

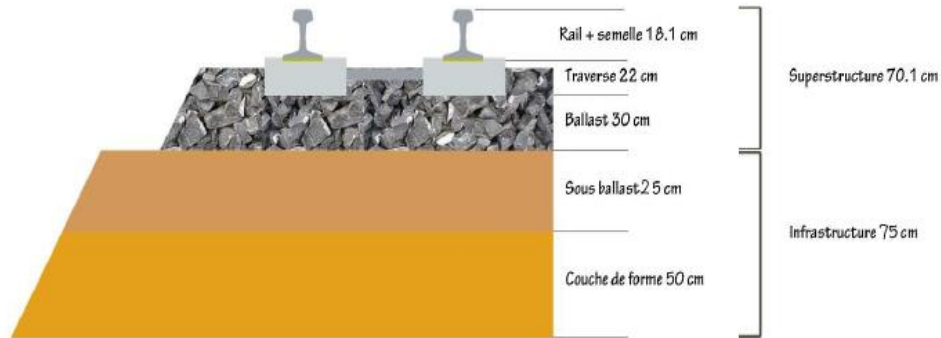


Figure VI.2. les différentes épaisseurs de la voie.

VI.4. Cubatures

Les volumes des différentes couches sont calculés par le logiciel Autocad Civil 3D et sont comme suit :

Tableau VI.5. Quantités des matériaux

Matériau	Volume en m ³
Ballast	8 005.40
Sous-couche	23 268.75
Couche de forme	54 750.00
Remblai	695 322.27
Déblai	381 398.00

VI.5. Conclusion

Les éléments du profil en travers sont dimensionnés pour assurer la transmission des efforts et charges appliqués par le trafic passant par la voie, d'où, la conception et dimensionnement de ces éléments assure la stabilité et le bon fonctionnement de la voie ferrée.

CHAPITRE VII : ETUDE HYDRAULIQUE ET ASSAINISSEMENT.

VII.1. Introduction

La réalisation d'une ligne ferroviaire apporte des modifications sur le terrain naturel, ces modifications perturbent les écoulements d'eau naturels préexistants provenant des précipitations atmosphériques ainsi que des affleurements d'eaux souterraines. Pour assurer la stabilité de L'infrastructure et afin d'éviter toute inondation de celle ci, on doit effectuer une étude hydrologique.

Le but de cette étude hydrologique est donc la détermination des débits des crues tout au long du nouveau tracé de cette voie ferrée afin d'éviter tout risque inondation, et de prévoir ainsi l'aménagement hydraulique le plus approprié.

VII.2. Présentation hydrologique de la zone

La région étudiée fait partie de la plaine du Hodna connue par l'importance de ses dimensions, par sa structure en cuvette et par le potentiel que représente une ceinture montagneuse parfois bien arrosée tels que les Monts du Hodna au Nord. Le bassin versant du Hodna codé (05) par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques) , marque la transition entre le domaine tellien au nord et le sahara au sud . Il est d'une superficie de 26000 Km².

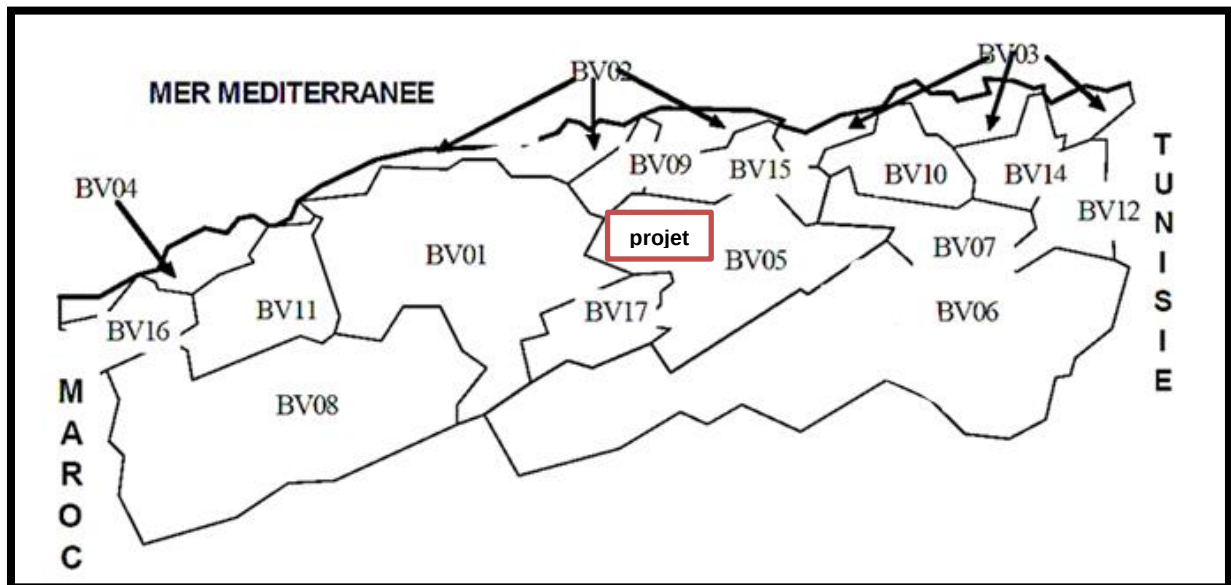


Figure VII.1. Carte de situation de la région d'étude.

VII.2.1. Caractéristiques du climat

L'étude climatologique d'une région a pour but de définir les principaux caractères climatiques de la zone du projet, afin d'établir l'incidence qu'ils pourraient avoir sur les travaux à réaliser.

La région d'étude se caractérise par un climat aride avec parfois des averses très importantes qui peuvent conduire à des catastrophes naturelles.

Tableau VII.1. Températures moyennes de la région.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T(°C)	4.2	5.7	8.2	11.4	15.5	20.1	24.2	23.9	19.7	13.6	8.7	5.2

Le climat de la région est dit "de steppe. En moyenne la température est de 13.4 °C. Les précipitations annuelles moyennes sont de 338 mm.

Avec une température moyenne de 24.2 °C, le mois de Juillet est le plus chaud de l'année. Au mois de Janvier, la température moyenne est de 4.5 °C. Janvier est de ce fait le mois le plus froid de l'année.

VII.2.2. Pluviométrie

VII.2.2.1. Données de Base

En phase d'APD, les données disponibles concernant les précipitations mensuelles observées dans les stations météorologiques de Boughezoul et M'Sila, situées au début et à la fin du tracé de la ligne ferroviaire Boughezoul-M'Sila (151 km), ont été obtenues auprès du Centre Climatologique National. Les précipitations annuelles moyennes enregistrées dans ces stations, pour la période allant de 1983 à 2005, sont indiquées dans le tableau suivant:

Tableau VII.2. Précipitations mensuelles et annuelles.

Mois/Station	Minimum [mm]		Maximum [mm]	
	Boughezoul	M'Sila	Boughezoul	M'Sila
Janvier	0,0	0,0	68,6	74,7
Février	0,0	0,0	50,1	34,8
Mars	0,0	0,0	74,1	62,1
Avril	0,0	0,0	41,6	45,2
Mai	0,0	0,0	100,9	97,7
Juin	0,0	0,0	46,8	40,2
Juillet	0,0	0,0	75,4	25,1
Août	0,0	0,0	30,9	29,2
Septembre	3,0	0,0	66,3	61,1
Octobre	1,7	0,0	76,2	83,0
Novembre	4,0	0,0	56,7	73,4
Décembre	0,0	0,9	73,9	58,2
Année	110,0	80,8	334,5	351,0

VII.2.2.2. Précipitation de courte durée

- Précipitation journalière :

On dispose, pour les deux stations météorologiques considérées en phase d'APD, des valeurs fournies par le Centre Climatologique National concernant les pluies journalières maximales et ce pour différentes périodes de retour, à savoir:

Tableau VII.3. Précipitation journalière.

Période de retour	Pluie Maximale en 24 heures [mm/24 h]	
	Boughezoul	M'Sila
2 ans	22,0	21,5
5 ans	33,0	29,2
10 ans	39,7	34,4

25 ans	48,5	40,9
50 ans	55,0	45,7
100 ans	61,3	51,0

Cependant, ce sont les plus fortes précipitations, avec une importante quantité d'eau tombant en peu de temps, qui sollicitent le plus les organes de drainage. Jusqu'au point kilométrique (pk) 215+000, les données des précipitations seront définies par la station de Boughezoul. Après de pk 215+000, les données des précipitations seront définies par la station de M'Sila.

- Pluie en 24 heures :

Les valeurs des précipitations maximales, indiquées ci-dessus, font référence à une période de 24 heures entre les heures de prise des échantillons (normalement entre 9 heures d'un jour et 9 heures du jour suivant). Donc, les averses couvrant deux périodes d'échantillonnage adjacentes ne seront pas considérés. Pour obtenir une estimation de la quantité de pluie maximale en 24 heures, on devra donc multiplier la valeur journalière par un coefficient de majoration. Si on ne dispose pas d'autres indications, on utilisera la valeur proposée par l'Organisation Météorologique Mondiale de 1,13 :

$$P_{24T} = 1,13 \times P_{JT}$$

Dans le cadre de cette étude, on a adopté pour la quantité des précipitations maximales journalières moyennes, pour une période de cent ans, 69,3 mm pour Boughezoul et 57,7 mm pour M'Sila.

Pour une période de dix ans, on a adopté une valeur de 45,0 mm pour Boughezoul et de 39,0 mm pour M'Sila.

VII.2.3. Caractéristiques des bassins versants

L'objectif des calculs, inclus dans cette étude, est d'établir les débits de pointe de crues associés à une période de retour de 100 ans, pour les bassins versants interceptés. L'analyse des bassins versants a été effectuée sur cartographie à l'échelle 1:50 000.

VII.2.3.1. Caractéristiques physiques des bassins versants

Pour le développement du modèle de simulation des crues dans chaque bassin, les caractéristiques physiques principales de ces derniers ont été déterminées, notamment:

- Surface du bassin.
- Longueur du talweg.
- Cote maximale et cote minimale.
- Pente moyenne.

- Superficie (a) :

La superficie du bassin versant est la portion du plan délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin, les débits vont être en partie reliés à sa surface.

- La pente moyenne du thalweg :

La pente du thalweg est exprimée par le rapport suivant :

$$I = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

H_{max} : Hauteur maximale du thalweg.

H_{min} : Hauteur minimale du thalweg.

L : Longueur du thalweg.

- Le coefficient de ruissellement :

Le coefficient de ruissellement est en fonction des caractéristiques et des conditions d'infiltration du sol, ainsi que de la période de retour, de l'intensité de précipitation, de la proximité de la nappe phréatique, du degré de compactage du sol, de sa porosité, du couvert végétal, de la typologie d'occupation et de la pente du bassin, etc.

Pour le choix du coefficient d'écoulement, on a tenu compte de tous les aspects mentionnés dans le paragraphe précédent et l'on s'est basé sur le guide technique d'assainissement SETRA, notamment sur le tableau ci-dessous, ainsi que sur les valeurs généralement utilisées pour la zone d'étude.

Le terrain situé entre Boughezoul et M'Sila a de faibles dénivellations. L'ensemble du tracé repose, essentiellement, sur un sol sableux. Compte tenu de ces conditions de végétation et de sol, une grande partie des précipitations s'écoule en cas de fortes pluies.

Tableau VII.4. Coefficient de ruissèlement (SETRA).

Morphologie	Pente (%)	Coefficient de ruissellement (C)
Presque plat	P<5%	0,30
Ondulé	5%<P<10%	0,40
Montagneux	10%<P<30%	0,52

Tableau VII.5. Caractéristiques des bassins versants.

Bassin versant	PK	Surface (Km ²)	Longueur (m)	ΔH (m)	Pente i (m/m)	C
BV1	161+059	0.162	250	12	0.048	0.30
BV2	161+399	0.345	700	16.1	0.023	0.30
BV3	162+182	7.908	6655	106.48	0.016	0.30
BV4	163+488	5.591	5080	96.52	0.019	0.30
BV5	165+214	2.882	3315	89.505	0.027	0.30
BV6	166+171	0.419	965	35.705	0.037	0.30
BV7	167+859	0.617	1015	24.36	0.024	0.30
BV8	168+040	0.405	1235	51.87	0.042	0.30
BV9	168+154	0.347	1085	47.74	0.044	0.30
BV10	168+413	0.279	420	49.4	0.011	0.30

BV11	168+610	0.419	855	42.75	0.050	0.40
BV12	168+809	0.329	933	47.7	0.051	0.40
BV13	169+042	0.265	800	40.8	0.051	0.40
BV14	169+628	0.322	620	40.92	0.066	0.40
BV15	170+188	2.110	2250	63	0.028	0.30
BV16	170+665	0.671	2945	55.955	0.019	0.30

VII.3. Estimation des débits de crue

La crue est une augmentation brutale du débit due à des averses exceptionnelles, les ouvrages projetés doivent pouvoir évacuer, dans les conditions satisfaisantes, les volumes d'eau des bassins qu'ils desservent.

Les ouvrages sont calculés non pour la forte précipitation pluviale connue, mais pour une précipitation donnée dont la probabilité est déterminée.

Pour estimer le débit des crues des différents bassins versant obtenus par délimitation, on peut utiliser la formule rationnelle donnée ci-dessous :

$$Q_{max} = 0.00278 \times A \times I \times C$$

Q_{max} : Débit de pointe à l'exutoire en m³/s.

A : Superficie du bassin versant en Ha.

I : Intensité moyenne de pluie correspondant au temps de concentration en mm/h.

C : Coefficient de ruissellement du bassin versant.

Cette formule est valable pour les petit bassins versant ($A < 250$ ha) .

VII.3.1. Intensité de la pluie (I)

Pour une période de retour donnée, l'intensité moyenne de précipitation correspondante au temps de concentration du bassin versant correspond à la précipitation totale, tombée pendant cette période, divisée par le temps de concentration, soit :

$$I = \frac{P_t(f\%)}{T_c}$$

I : Intensité de pluie en mm/h.

$P_t(f\%)$: Pluie maximale de durée (t) et de fréquence (f) en mm.

T_c : Temps de concentration en heure.

La méthodologie adoptée pour déterminer l'intensité de la pluie, consiste d'abord à suivre les étapes de calcul pour déterminer le temps de concentration et la pluie maximale.

- Le temps de concentration T_c :

Le temps de concentration est le temps que mettent des gouttes d'eau non évaporées et non infiltrées dans le Sol de descendre du sommet du bassin versant jusqu'à l'exutoire .Quand ce temps de concentration est atteint, ceci signifie que toutes les régions du bassin

versant participent au débit. Plus la topographie est accentuée, moins le temps de concentration est long.

Pour calculer le temps de concentration de chaque bassin, on propose l'application de différentes formules utilisées en Algérie, ci-dessous indiquées, en fonction de la surface des bassins versants.

Formule de Ventura (A inférieur à 5 km²) :

$$T_c = 0.127 \times \sqrt{\frac{A}{I}}$$

T_c : temps de concentration (heure).

A : aire du bassin (km²).

I : pente du lit (m/m).

Formule de Passini (A comprise entre 5 km² et 25 km²) :

$$T_c = 0.108 \frac{\sqrt[3]{A \times L}}{\sqrt{I}}$$

T_c : temps de concentration (heure).

L : longueur du talweg (km).

A : aire du bassin (km²).

I : pente du lit (m/m).

- La pluie maximale de durée (t) et de fréquence (f) :

Pour une période de retour donnée, l'intensité moyenne de précipitation correspondante au temps de concentration du bassin versant correspond à la précipitation totale, tombée pendant cette période, divisée par le temps de concentration, soit :

$$P_t(f\%) = 1.13 \times P_j(f\%) \times \left(\frac{t}{24}\right)^b$$

$P_t(f\%)$: Pluie maximale de durée (t) et de fréquence (f) en mm.

$P_j(f\%)$: Pluie journalière maximale pour une fréquence donnée en mm.

b : Exposant climatique = 0.3 pour la région de Boughezoul-M'sila.

t : Durée de pluie égale au temps de concentration en heure.

VII.3.2. Calcul des crues

Prenons le bassin versant 1 comme exemple de calcul des crues :

Tableau VII.6. Caractéristiques du bassin versant 1.

A (km ²)	L (km)	C	B	I (m/m)	P_j (f %) (mm)
0.162	250	0.30	0.3	0.048	61.3

- Temps de concentration : $A < 5 \text{ Km}^2$ donc on applique la formule de VENTURA.

$$T_C = 0.127 \times \sqrt{\frac{A}{I}}$$

$$\rightarrow T_C = 0.127 \times \sqrt{\frac{0.162}{0.048}} = 0.233 \text{ h}$$

- La pluie de durée (t) et de fréquence (f) :

$$P_t(f\%) = 1.13 \times P_j(f\%) \times \left(\frac{t}{24}\right)^b$$

$$\rightarrow P_t(f\%) = 1.13 \times 61.3 \times \left(\frac{0.233}{24}\right)^{0.3} = 17.25 \text{ mm}$$

- L'intensité de pluie I :

$$I = \frac{P_t(f\%)}{T_C}$$

$$\rightarrow I = \frac{17.25}{0.233} = 74.03 \text{ mm/h}$$

- Calcul du débit de crue :

$$Q_{max} = 0.00278 \times A \times I \times C$$

$$\rightarrow Q_{max} = 0.00278 \times 16.2 \times 74.03 \times 0.3 = 1.00 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Tableau VII.7. Résultats des débits d'apport.

Bassin versant	A (Km ²)	T _C (h)	I (mm/h)	Q _{max} (m ³ /s)
BV1	0.162	0.233	74.03	1.00
BV2	0.345	0.492	43.87	1.26
BV3	7.908	1.485	20.24	13.35
BV4	5.591	1.110	24.82	11.57
BV5	2.882	1.312	20.08	5.31
BV6	0.419	0.427	48.41	1.67
BV7	0.617	0,643	36,33	1,87
BV8	0.405	0,394	51.21	1.73
BV9	0.347	0.357	54.94	1.59
BV10	0.279	0.640	36.50	0.85
BV11	0.419	0.368	53.79	2.51
BV12	0.329	0.323	58.94	2.16
BV13	0.265	0.289	63.59	1.87
BV14	0.322	0.280	65	2.33
BV15	2.110	1.102	24.94	4.39

BV16	0.671	0.754	32.51	1.82
-------------	-------	-------	-------	------

VII.4. Dimensionnement des ouvrages hydrauliques

Le dimensionnement des ouvrages hydrauliques est effectué selon les calculs hydrauliques. Des buses et des dalots, disposés sous la voie, seront prévus pour les oueds. La taille des dalots a été sélectionnée en fonction du débit d'eau entrant, selon le dimensionnement hydraulique effectué avec la formule de Manning-Strickler .

Les critères de conception des dalots et des buses retenus pour le projet sont :

- La satisfaction de la condition d'auto curage.
- La vitesse maximale doit être inférieure à 4 m/s pour limiter l'érosion.
- Les vitesses doivent respecter les critères suivants vis-à-vis de la durabilité des ouvrages :
 - Ouvrages en béton : ≤ 4 m/s.
 - Ouvrages métalliques : ≤ 2.5 m/s.

VII.4.1. Dimensionnement des dalots

Les dalots sont constitués par deux murettes verticales au pied droit sur lesquelles repose une dalle ou une série de dalles accolées, les pieds droits sont posés sur une fondation ou radier.

On calcule par itération les dimensions du dalot en utilisant la formule de Manning Strickler , les calculs hydrauliques des ouvertures rectangulaires doivent être vérifiés pour un taux de remplissage $h = 0.8h$

$$Q_S = K_S \times R_h^{2/3} \times S_m \times J^{1/2}$$

Q_S : Débit maximal.

$S_m = 0.8h \times L$: Section mouillée.

$P_m = (0.8 \times 2 \times h) + L$: Périmètre mouillé.

$R_h = S_m / P_m$: Rayon hydraulique.

K_S : Coefficient de rugosité (Manning Strickler) dépend de la nature des parois internes de l'ouvrage.

J : Pente longitudinale de l'ouvrage (m/m).

Les hypothèses suivantes ont été émises pour le dimensionnement :

- Coefficient de rugosité Strickler $K_S = 70$ (correspond à du béton grossier avec coffrage bois / béton damé).
- Pente $J = 1$ %.

$$Q_{max} = Q_s$$

$$Q_{max} = K_s \times R_h^{2/3} \times S_m \times J^{1/2}$$

$$Q_{max} = K_s \times \left(\frac{0.8h \times L}{(0.8 \times 2 \times h) + L} \right)^{2/3} \times 0.8h \times L \times J^{1/2}$$

$$\rightarrow L = \left(\frac{Q_{max}}{K_s \times J^{1/2}} \right)^{3/5} \times \left(\frac{(L+2 \times 0.8h)^{2/3}}{(0.8h)^{5/3}} \right)^{3/5}$$

Exemple de dimensionnement d'un dalot :

Prenons le bassin versant 03 comme exemple :

Tableau VII.8. Caractéristiques du bassin versant 03.

Q_{max} (m ³ /s)	K_s	J (m/m)	H (m)	L_0 (m)
2.51	70	0.01	1	0.99

Tableau VII.9. Itération des longueurs.

Itération	Longueur (m)
1 ère itération	0.990
2 ème itération	0.988
3 ème itération	0.988

Après un nombre d'itération on trouve : $L_n = 0.988 \text{ m}$

On prend : $L = 1 \text{ m}$

– Vérification de la vitesse :

$$S_m = 0.8h \times L$$

$$\rightarrow S_m = 0.8 \times 1 \times 1 = 0.8 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q_{max}}{S_m}$$

$$\rightarrow V = \frac{2.51}{0.8} = 3.14 \text{ m/s} < 4 \text{ m/s}$$

– Vérification des conditions d'auto curage :

$$S_m = h \times L$$

$$S_m = 1 \times 1 = 1 \text{ m}^2$$

$$R_h = \frac{L \times h}{2 \times (L + h)}$$

$$R_h = \frac{1 \times 1}{(1+1) \times 2} = 0.25 \text{ m}$$

$$Q_{ps} = 70 \times 1 \times 0.25^{2/3} \times \sqrt{0.01} = 2.78 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_{ps} = \frac{Q_{ps}}{S_m} = 2.78 \text{ m/s}$$

$$R_q = \frac{Q_{max}}{Q_{ps}} = 0.902$$

$$V = R_V \times V_{ps}$$

- On tire R_V du tableau d'assainissement qui est égale à 1.130
 $V = 1.130 \times 2.78 = 3.141 \text{ m/s}$

Tableau VII.10. Conditions d'auto curage du dalot (BV 03).

Condition 01 V>1m/s		Condition 02 V>0.6m/s				Condition 03 V>0.3m/s			
V	Vérification	R _q /10	r _v	V	Vérification	R _q /100	r _v	V	Vérification
3.141	Oui	0.0902	0.621	1.72	Oui	0.00902	0.30 2	0.84	Oui

On tire le rapport des hauteurs r_h en fonction de R_q du tableau d'assainissement

$$r_h = 0.745 < 0.8 \text{ (Le rapport des hauteurs vérifié).}$$

Conclusion : dalot bien dimensionné.

Tableau VII.11. Caractéristiques des dalots du projet.

Bassin Versant	PK	Q _{max} (m ³ /s)	L (m)	h (m)	Cellule	S _m (m)	P _m (m)	R _h (m)	J (%)	Q _s (m ³ /s)
BV3	162+182	13.35	1.5	1.5	2	1.8	3.9	0.46	1	15.05
BV4	163+488	11.57	1.5	1.5	2	1.8	3.9	0.46	1	15.05
BV5	165+214	5.31	1.5	1.5	1	1.8	3.9	0.46	1	7.53
BV11	168+610	2.51	1	1	1	0.8	2.6	0.31	1	2.55
BV15	170+188	4.39	1.5	1	1	1.2	3.1	0.39	1	4.46

VII.4.2. Dimensionnement des buses

Les ouvrages de sections circulaires, disposés sous le tracé, identifiés par le diamètre(Ø).

On calcule les dimensions de la buse par la formule de Manning Strickler, Les calculs hydrauliques des ouvertures circulaires doivent être vérifiés pour un taux de remplissage $h = 0.8h$

$$D_{th} = 1.5 \times \left(\frac{Q_{max}}{K_s \times \sqrt{J}} \right)^{3/8}$$

D_{th} : Diamètre théorique.

$K_s = 70$: Coefficient de rugosité.

$J = 0.3\%$: Pente de l'ouvrage.

Exemple de dimensionnement d'une buse :

Prenons le bassin versant 05 comme exemple :

Tableau VII.12. Caractéristique de la buse du bassin versant 05.

$Q_{max} (m^3/s)$	K_s	$J (m/m)$
1.26	70	0.01

$$D_{th} = 1.5 \times \left(\frac{Q_{max}}{K_s \times \sqrt{J}} \right)^{3/8}$$

$$D_{th} = 1.5 \times \left(\frac{1.26}{70 \times \sqrt{0.01}} \right)^{3/8} = 0.789 \text{ m}$$

On choisit un diamètre commercial de 1,00 m.

– Vérification de la vitesse :

$$V = \frac{Q_{max}}{S_m}$$

$$V = \frac{1.26}{0.68} = 1.85 \text{ m/s} < 4 \text{ m/s} .$$

– Vérification des conditions d'auto curage :

$$Q_{ps} = 0.31 \times \sqrt{J} \times K_s \times D^{\frac{3}{8}}$$

$$Q_{ps} = 0.31 \times \sqrt{0.01} \times 70 \times 1^{\frac{3}{8}} = 2.17 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_{ps} = \frac{4 \times Q_{ps}}{\pi \times D^2} = 2.76 \text{ m/s}$$

$$R_q = \frac{Q_{max}}{Q_{ps}} = 0.58$$

$$V = R_V \times V_{ps}$$

On tire R_V du tableau d'assainissement qui est égale à 1.036

$$V = 1.036 \times 2.76 = 2.86 \text{ m/s}$$

Tableau VII.13. Conditions d'auto curage de la buse (BV5).

Condition 01 V>1m/s		Condition 02 V>0.6m/s				Condition 03 V>0.3m/s			
V	Vérification	R _q /10	r _v	V	Vérification	R _q /100	r _v	V	Vérification
2.86	Oui	0.058	0.542	1.496	Oui	0.0058	0.276	0.762	Oui

On tire le rapport des hauteurs r_h en fonction de R_q du tableau d'assainissement

$$r_h = 0.547 < 0.8 \text{ (Le rapport des hauteurs vérifié).}$$

Conclusion : buse bien dimensionnée.

Tableau VII.14. Caractéristiques des buses du projet.

Bassin versant	PK	Q _{max} (m ³ /s)	D _{calculé}	D _{commercial}	Q(m ³ /s)	V(m/s)
BV1	161+059	1.00	0,723	1	2.13	1,67
BV2	161+399	1.26	0,789	1	2.13	1,67
BV6	166+171	1.67	0,876	1.2	3.47	3,92
BV7	167+859	1,87	0,914	1.2	3.47	3,92
BV8	168+040	1.73	0,888	1.2	3.47	3,92
BV9	168+154	1.59	0,860	1.2	3.47	3,92
BV10	168+413	0.85	0,680	1	2.13	1,67
BV12	168+809	2.16	0,965	1.2	3.47	3,92
BV13	169+042	1.87	0,914	1.2	3.47	3,92
BV14	169+628	2.33	0,993	1.2	3.47	3,92
BV16	170+665	1.00	0,723	1	2.13	1,67

VII.4.3. Dimensionnement des fossés

Les fossés sont des ouvrages linéaires qui véhiculent les débits des eaux de surface drainée avec un écoulement à surface libre aussi bien de l'infrastructure que des bassins versants en interaction avec le projet afin de les acheminer vers un point de rejet (exutoire) hors de l'emprise de la voie ferrée .

Des fossés de drainage ont été disposés dans les déblais, des deux côtés du palier de la voie. Pour le dimensionnement des fossés, on utilise la formule de Manning-Strickler :

$$Q_S = K_S \times R_h^{2/3} \times S_m \times J^{1/2}$$

$$\text{La surface mouillée : } S_m = (b + z \times h) \times h$$

$$\text{Le périmètre mouillé : } P_m = b + 2h \times \sqrt{1 + Z^2}$$

$$\text{Le rayon hydraulique : } R_h = \frac{S_m}{P_m}$$

Avec :

z : La pente des berges

h : La hauteur maximale admissible de remplissage pour l'écoulement dans les fossés qui est égale la hauteur totale.

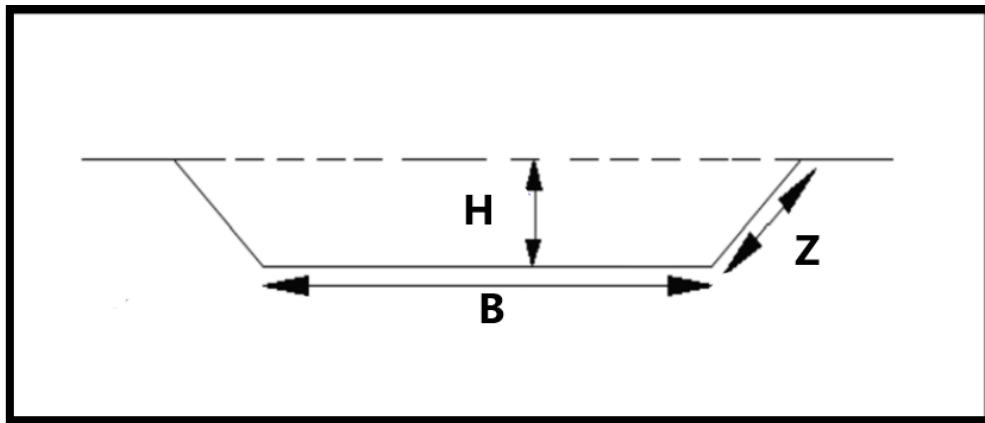


Figure VII.2. Fossé trapézoïdale.

Les dimensions du fossé sont obtenues, en écrivant l'égalité du débit d'apport et le débit de saturation.

Le choix de type du fossé est en fonction du débit à évacuer qui est rapporté par la plateforme, les bermes et les talus : $Q_a = Q_{pf} + Q_t$.

Tableau VII.15. Calcul des débits d'apport des talus.

Déblai	Caractéristiques	
Talus	Cr	0.7
	A (m ²)	13700
	I (mm/s)	440.89
	Qt (m ³ /s)	1.18
Plate-forme	Cr	0.5
	A (m ²)	5440
	I (mm/s)	227.55
	Q _{pf} (m ³ /s)	0.17
Q _a (m ³ /s)	Q _t + Q _{pf}	1.35

Les hypothèses suivantes ont été émises pour le dimensionnement :

- Coefficient de rugosité Strickler $K_s = 50$ (correspondant à des fossés consolidés, revêtement en béton grossier).
- Pente - La déclivité longitudinale des fossés en zone de déblai est identique au gradient du profil en long de la voie.
- Forme de construction - Profil trapézoïdal avec déclivité du talus 1:1,5.

Tableau VII.16. Caractéristiques du fossé.

b (m)	h (m)	Z (m)	S _m (m ²)	P _m (m)	R _h (m)	K _s	I (m/m)	Q _s (m ³ /s)
0.5	0.5	1	0.5	1.91	0.26	50	0.02	4.55

VII.5. Conclusion

D'après l'étude hydrologique et hydraulique, on déduit que le tracé projeté comporte un volet des travaux important en termes d'ouvrages de drainage longitudinal et transversal. Ces travaux doivent être exécuté avec prise en priorité, afin d'éviter les dégradations de la plateforme en cas des crues.

CHAPITRE VIII : AMENAGEMENT DES GARES.

VIII.1. Introduction

Une gare ferroviaire est le lieu d'arrêt des trains. Une gare comprend diverses installations qui ont une double fonction : permettre la montée et la descente des voyageurs, ou le chargement et le déchargement des marchandises ainsi que pour certaines d'entre elles, assurer des fonctions de sécurité dans la circulation des trains.

VIII.2. Les différents types de gares

On distingue trois types de gares :

- Gares voyageurs :

Les gares voyageurs, souvent perçues comme des bâtiments, sont en fait des ensembles fonctionnels plus larges, conçus pour regrouper toutes les fonctions centrées sur l'accès au train, dont l'information sur le voyage, l'achat des titres de transports, ainsi que divers services commerciaux liés au voyage.

Les gares peu importantes, qui constituent un simple point d'arrêt, souvent sans personnel permanent, sont appelées « haltes » ou « points d'arrêt ».

Les gares principales situées dans les grandes villes sont des lieux d'échange entre le mode ferroviaire et les divers modes de transport urbains (bus, tramway, métro) , on parle alors de pôles d'échanges.

On distinguera deux types de gares de voyageurs :

- Gares terminus :

Le bâtiment est généralement au bout des quais et perpendiculaire à ceux-ci , il est souvent composé symétriquement : un côté pour les départs, et l'autre pour les arrivées.

- Gares de passage :

C'est le cas le plus fréquent. Le bâtiment est généralement le long des voies, du côté orienté vers le centre de l'agglomération. On accède aux quais par une passerelle ou un souterrain. Il arrive qu'il soit placé au-dessus des quais. Les installations d'accueil des voyageurs peuvent aussi se trouver sous les quais.

- Gares aux marchandises :

Une gare aux marchandises parfois appelée gare de fret, est une gare ferroviaire destinée uniquement au trafic des marchandises.

Les gares aux marchandises occupent de vastes emprises et disposent d'un large faisceau de voies pour la réception des trains, le tri des wagons et les manœuvres.

Elles comportent un bâtiment principal à vocation administrative, des halles à marchandises, des hangars et entrepôts ainsi que de vastes cours, dans lesquelles s'opérait le transbordement des chargements entre les wagons et les véhicules routiers assurant la livraison terminale vers les installations des clients (expéditeurs ou destinataires). Ces cours pouvaient alors comporter des grues ou des portiques de manutention ainsi que des quais de chargement.

- Gares de triage :

Les gares de triage assurent la reconstitution des trains dits du lotissement, c'est-à-dire des trains qui acheminent les wagons isolés.

VIII.3. Installations d'une gare voyageurs

Dans une gare ferroviaire, on peut trouver plusieurs installations :

- **Le bâtiment voyageurs (BV) :** c'est un espace destiné à l'accueil des voyageurs, il comporte un hall, des guichets (ou espace de vente) ainsi qu'une ou plusieurs salles d'attente.
- **Les bâtiments à usages divers (B.U.D) :** ce sont des espaces réservés aux agents de chemins de fer.
- **Quais :** c'est un aménagement parallèle à la voie ferrée et permettant l'accès aux trains. Il est souvent surélevé par rapport au niveau de la voie pour faciliter l'accès au train.
- **Abris de quais :** c'est une installation sur le quai qui a pour but de protéger les voyageurs des intempéries.
- **Les passages sous terrain et les passerelles :** ils sont construits dans les gares pour permettre aux voyageurs d'accéder aux quais et de traverser la voie en toute sécurité.

VIII.4. La gare voyageurs de Birine

La ligne Boughezoul-M'sila comporte 4 gares, Boughezoul pour le transport de marchandises, Bouti-Sayeh, Birine et Ain Lahdjet pour le transport de voyageurs. Le tronçon objet de notre étude se termine à la gare de Birine.

On a intégré dans la conception du tracé un alignement suffisant qui permettra d'implanter la totalité de la gare de Birine en alignement droit. Cet alignement droit commence au Pk169+253,439 et se termine au Pk 170+698,439.



Figure VIII.1. Vue en 3D de la façade principale la gare voyageurs de Birine.

VIII.4.1. Aménagement intérieur

L'amélioration de l'aspect architectural de la gare a été imposée par l'insertion d'une structure en charpente métallique avec un mur radieux au niveau du bloc central du bâtiment voyageur.

- Réalisation d'un hall central de 10 mètres de hauteur en structure métallique, revêtu en mur rideau et en panneaux composite (aluminium), en forme demi circulaire en créant une mezzanine qui abritera une cafeteria pour les voyageurs.
- Le hall est doté d'un espace d'attente, de guichets, d'un local pour le contrôle, la cafeteria, les sanitaires. Une partie est réservée au personnel chargé de l'exploitation de la gare. Elle est dotée d'un accès qui donne sur un couloir desservant tous les bureaux : chef de gare, chef de service, archives, secrétariat, chef de district, chef de sécurité, dépôt et les sanitaires, la salle de réunion .
- La circulation des voyageurs est définie de manière à permettre le passage depuis le hall vers les quais directement par des escaliers.
- La disposition des guichets de manière à dégager les espaces et afin d'avoir une sortie pour les départs et pour l'arrivée ce qui permettra d'assurer une meilleure fluidité de circulation au niveau du hall.
- Revêtement de façades et matériaux :
 - Les façades des deux blocs latéraux recevront un revêtement céramique ventilé (façades ventilées) pour ses propriétés d'isolation thermique et phonique mais aussi pour sa bonne finition.

- Le bloc central recevra un revêtement de toit en panneaux composite en aluminium et les parois latérales seront en murs rideau.
- Les portes et les fenêtres seront en menuiserie aluminium (portes principales automatique)
- L'auvent de l'entrée principale ainsi que l'élément d'appel et les abris des quais seront en panneaux composite monté sur les rails en aluminium, avec spots lumineux encastrés dedans pour créer une ambiance conviviale et permettre la lisibilité de la gare le soir et ses aménagement.
- Une horloge à cadrons lumineux sera posé au sommet de l'élément d'appel.
- Les panneaux seront posés à l'horizontale pour accentuer l'effet de largeur du bâtiment.

VIII.4.2. Aménagement extérieur

- Créer un aménagement extérieur qui mettra en avant le bâtiment voyageur tout en réalisant un élément d'appel pour permettre la lisibilité de la gare à partir du milieu urbain.
- Prévoir un élément d'appel vertical à l'entrée de la gare.
- Prévoir des zones spacieuses favorisant la circulation des piétons à l'entrée de la gare, des espaces verts, une grande esplanade piétonne arborée pourvue de bancs est envisagée.
- Une gare routière sera aménagée à côté du bâtiment voyageur avec des abribus, des bancs et des espaces verts.
- Aménager un espace en face du bâtiment voyageurs pour une station de taxi qui peut recevoir 12 voitures de taxi.
- Plusieurs espaces de stationnement sont envisagés :
 - Un parking pour le personnel avec une capacité d'accueil de 33 places.
 - Un espace devant l'entrée du bâtiment pour l'arrêt temporaire : 3 places.
 - Un parking pour les usagers avec une capacité d'accueil de 120 places.
 - Un parking deux roues avec une capacité d'accueil de 30 places.
- Un poste de garde est prévu à côté du parking du personnel.
- Une bâche à eaux de 200 m³ sera réalisée à côté du bâtiment voyageurs.
- Au sud de la gare, un espace est réservé aux différents commerces, sur sa gauche se trouve une propriété SNTF.

NB : le plan 'aménagement de la gare est joint dans l'annexe.



Figure VIII.2. Vue en 3D de l'élément d'appel.

- Aménagement de quai :



Figure VIII.3. Vue en 3D de la gare côté quai.

- Le dimensionnement des quais a été fait en fonction des passagers qui peuvent utiliser le service ferroviaire tout en assurant la commodité des utilisateurs (bancs, panneaux informatives, passages inférieurs, etc.) :
 - Les dimensions du quai A soit (225m x 6.00m) avec une surface de 1350 m².
 - Les dimensions du quai B soit (225m x 8.00 m) avec une surface de 1800 m².
- Prévoir une bande tactile de (30cm) tout le long du quai pour les personnes non voyantes.
- L'ouverture du passage inférieur sur le quai -A- et -B- a permis de réduire considérablement l'espace réservé aux voyageurs, ce qui pose un souci majeur sur le plan sécuritaire, risque de (Bousculade) lors des arrivées et départs, afin d'y remédier la commission a exigée de couvrir de moitié la partie centrale du quai afin d'élargir ce dernier et permettre de poser les abris de quai afin d'offrir une sécurité totale aux voyageurs.



Figure VIII.4. La partie centrale du quai.

- Modèle d'abris de quai proposé :
 - Les quais seront dotés d'abris de quais pour protéger les voyageurs des intempéries.



Figure VIII.5. Abris de quai.

VIII.4.3. Exploitation de la gare voyageurs

La gare voyageurs de Birine est conçue avec 3 voies et 6 appareils de voie, la voie de réception / départ pour les trains voyageurs est la voie Principale A.

La gare est équipée de 2 quais (225m x 6.00m) et (225m x 8.00m). La circulation des voyageurs entre les trains et le bâtiment voyageur peut se faire simplement par le passage sur les quais qui sont reliés après les heurtoirs de la voie de desserte de quais.

Les quais sont connectés par une passerelle pour piétons pour permettre aux voyageurs d'accéder aux quais et de traverser la voie en toute sécurité.

Le plan de pose est établi pour contenir les 3 voies des quais :

- La voie principale : voie A.
- Les voies de service :
 - La Voie d'évitement : voie 3.
 - La Voie de garage: voie B.

La voie principale est circulée à une vitesse de 160 Km/h. Un train direct qui ne s'arrêtera pas à la gare de Birine peut maintenir la vitesse de 160 Km/h entre les deux extrémités de la ligne.

La voie d'évitement 3 permet à deux trains circulant en sens contraires sur la voie principale de se croiser.

La voie de garage B, Elle assure l'effacement d'une circulation lente circulant devant un ou plusieurs trains plus rapides. Le garage du train lent (train marchandises) permet au train rapide (train voyageurs) de poursuivre sa marche et de faire les dépassements selon les besoins de l'exploitation de la ligne et sans subir de ralentissement.

Les trains provenant de la voie unique en direction de la gare de voyageurs peuvent desservir la voie principale A et la voie de garage B à l'aide du premier appareil de voie (UIC 1/12) .

Les mêmes trains provenant de la voie unique en direction de la gare de voyageurs , et qui circulent sur la voie principale A , peuvent rester sur la même voie ou desservir la voie d'évitement 3. Ces deux voies sont reliées par un changement de voie constitué à l'aide du deuxième appareil de voie (UIC 1/12). De plus, le troisième appareil de voie (UIC 1/9) permet aux trains de desservir la voie qui donne accès aux quais A et B.

La nouvelle gare de Birine est munie aussi des installations suivantes :

- Un tiroir de sécurité protégeant la voie réception/départ (Voie 3) des trains voyageurs. Ce tiroir permettra aussi le stationnement des locomotives de traction et finissant voyageurs en détresse.
- 2 heurtoirs ont été insérés dans la gare de Birine.
- Le tracé en plan est conçu en alignement droit permettant l'insertion de la totalité de la nouvelle gare en alignement droit.

VIII.4.4. Configuration fonctionnelle

VIII.4.4.1. La longueur utile des lignes de la gare

C'est la longueur nécessaire permettant au train de stationner sur la voie de dépassement sans gêner la circulation sur la voie principale ou les autres voies de dépassement voisines. La longueur utile est la distance séparant deux garages francs.

Une borne de garage franc est un signal qui indique la limite de stationnement permis du train à la voie de croisement. Théoriquement on pose ce signal à 3,57 m entre les deux voies. Compte tenu de la sécurité, il vaut mieux le poser un mètre plus loin par rapport à la position théorique. Le garage franc est implanté par rapport au cœur de l'appareil de voie à une distance de :

$$GF = 3.57 \times n + 1 \text{ (1m pour sécurité)}$$

n : varie selon l'ouverture de l'appareil de voie.

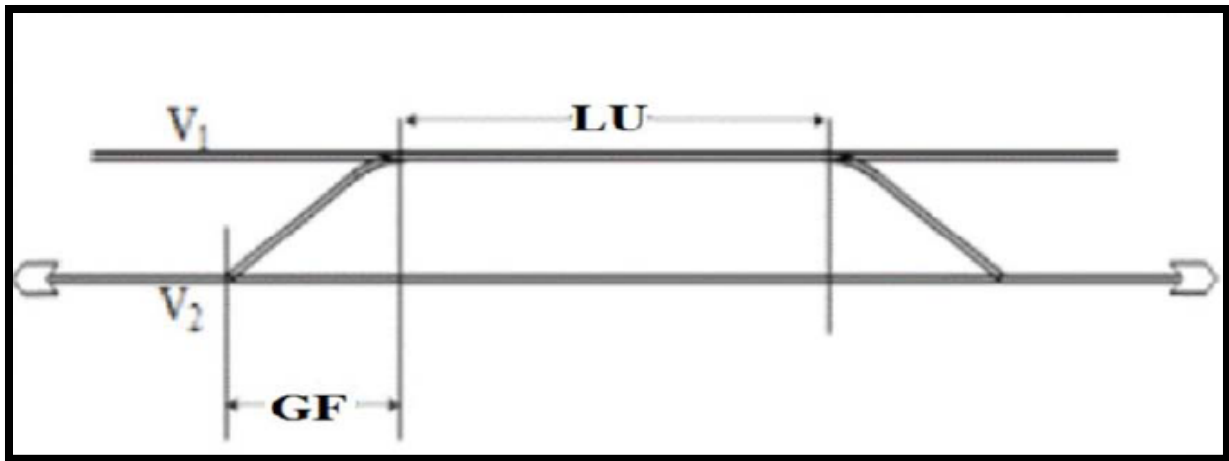


Figure VIII.6. Schéma représentatif de la longueur utile d'une voie.

$$L_U = L_G + L_S + L_T + L_A + L_C$$

L_G : longueur de glissement.

L_S : longueur de sécurité.

L_T : longueur maximale de train.

L_A : marge de tolérance d'arrêt.

L_C : tronçon d'isolation pour le système de contrôle.

Les valeurs de la longueur utile sont représentées dans la norme SNTF (aménagement et gare, tracé des voies), tel que :

- La longueur utile minimale pour les trains voyageurs est : 426 m.
- La longueur utile minimale pour les trains de marchandise est : 870 m pour la voie principale et la voie de service.

Tableau VIII.1. Longueur utile des lignes de la gare voyageurs.

Ligne	Longueur utile L_U (m)
Voie 3	1172
Voie A	1198
Voie B	1316

VIII.4.4.2. Les appareils de voie

Tableau VIII.2. Appareils de changement de voie de la gare voyageurs.

PK de l'appareil de voie	Vitesse	Type	Rayon (m)	Déviation	Tangente
169+253	70	UIC60	500	Droite	1/12
169+311	70	UIC60	500	Gauche	1/12
169+401	50	UIC60	300	Droite	1/9

Aménagement des gares.

170+548	50	UIC60	300	Gauche	1/9
170+638	70	UIC60	500	Droite	1/12
170+698	70	UIC60	500	Gauche	1/12

NB : le plan de pose des appareils de voies est joint dans l'annexe.

VIII.5. Conclusion

La gare de Birine est aménagée d'une manière à satisfaire les besoins des usagers de cette région en termes de déplacement et communication.

L'aménagement de la gare de Birine est conforme aux normes en vigueur pour répondre aux exigences de sécurité et de confort.

CHAPITRE IX : LA SIGNALISATION FERROVIAIRE.

IX.1. Introduction

La signalisation ferroviaire est un système d'informations destiné à renseigner le conducteur d'une circulation ferroviaire lui donnant, sous forme de codes réalisés par des signaux de forme, de combinaisons, ou de couleur diverses, dont la signification est prédéfinie, disposés le long des voies ou en cabine, toutes les informations qui lui sont nécessaires afin de régler la marche de son convoi et rouler en toute sécurité.

IX.2. Rôle des installations de signalisation

La signalisation ferroviaire est un moyen de donner des ordres au conducteur d'un véhicule .Elle permet de résoudre les cinq grands problèmes suivants:

- les risques inhérents à la circulation ferroviaire :
 - le « nez à nez », quand deux trains se retrouvent face à face sur la même voie.
 - le « rattrapage », quand le train suiveur rattrape celui qui le précède.
 - la « prise en écharpe », quand un train arrive sur un aiguillage déjà occupé par un train venant d'une autre direction.
- les risques de déraillement (limitation de vitesse dans les courbes, les zones d'aiguillage et de travaux).
- les risques inhérents aux passages à niveau, intersections avec le réseau routier.

Les solutions correspondantes mettent en œuvre des dispositifs mécaniques et électriques complétés et régis par des prescriptions réglementaires :

- Le risque de nez-à-nez est pris en charge par les enclenchements de sens.
- Le risque de rattrapage est pris en charge par le cantonnement.
- Le risque de prise en écharpe est pris en charge par les enclenchements internes au poste d'aiguillage (enclenchement d'itinéraires, enclenchement de transit...).
- Les risques de déraillement sont pris en charge par les limitations de vitesse, des systèmes de surveillance des chargements, de chutes de rochers, de chutes de véhicules routiers et de la température des boîtes d'essieux.
- Les risques aux passages à niveau sont pris en charge par des dispositifs d'annonce des trains.

IX.3. Les signaux

Pour transmettre au conducteur des ordres et informations liées à la sécurité des circulations, il est fait usage de signaux.

Les signaux sont habituellement installés à gauche de la voie à laquelle ils s'adressent, ou dans la partie gauche au-dessus de cette voie.

La signalisation peut être mécanique ou lumineuse :

En signalisation mécanique (en voie de disparition), il est fait usage de signaux réalisés au moyen d'une aile ou d'une cocarde de couleur.

En signalisation lumineuse, il est fait usage de panneaux portant un ou plusieurs feux de couleur, généralement disposés sur un écran noir bordé d'un liseré blanc de forme oblongue ou circulaire.

Qu'elle soit mécanique ou lumineuse, la signalisation peut comporter en outre:

- des tableaux lumineux.
- des tableaux mécaniques fixes ou effaçables.
- des tableaux ou pancartes réflectorisés.
- des guidons d'arrêt.

La signalisation comporte également des signaux à main (lampes, drapeaux) et des signaux acoustiques (pétards, coups de klaxon, bips radio) .

IX.4. La signalisation au sol

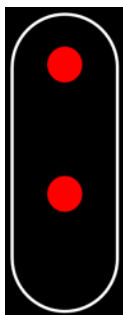
La signalisation au sol est constituée de signaux implantés à gauche ou au-dessus de la voie concernée. Elle est également appelée signalisation latérale. Elle peut être implantée sur des poteaux, des potences, des portiques.

IX.4.1. Signaux de protection

La signalisation de protection et destinée à interdire l'accès à un itinéraire, à une aiguille, à un passage à niveau etc... elle est généralement manœuvrée depuis des postes par des agents de Réseau.

Les principaux signaux de protection sont :

- Le carré : Il commande l'arrêt et ne doit en aucun cas être franchi.
- Le carré violet : Il Commande l'arrêt, Sur les voies de service (trilage, dépôt par exemple), le carré est remplacé par un carré violet.
- Le disque : Il commande au mécanicien de marquer l'arrêt au premier signal ou aiguillage rencontré.
- Le guidon d'arrêt : Il est en général utilisé pour limiter la zone de manœuvre, à la place d'un signal d'arrêt à main (protection d'appareils de voie isolés ou de passages à niveau).



Carré



Carré violet



Disque



Guidon d'arrêt

IX.4.2. Signaux de cantonnement

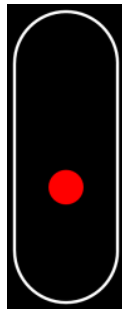
La signalisation de cantonnement et destinée à assurer l'espacement des circulations de même sens.

Sur les sections de lignes équipées en block automatique (BA), la Signalisation de cantonnement se ferme automatiquement dès l'occupation du canton et restent fermée jusqu'à sa complète libération.

Sur les sections de lignes équipées en block manuel (BM), Signalisation de cantonnement est manœuvrée depuis des postes par des agents du service de la gestion des infrastructures chargé de la gestion des circulations.

Les principaux signaux de cantonnement sont :

- Le sémaphore ou le feu rouge : Il commande au mécanicien de s'arrêter avant le signal.
- Le feu rouge clignotant: Il Marche sans dépasser la vitesse de 15km/h au franchissement de ce signal.



Feu rouge



Feu rouge clignotant

IX.4.3. Signaux d'annonce d'arrêt

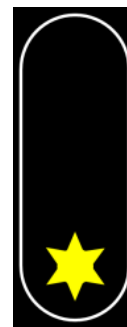
Le carré, le sémaphore et le feu rouge clignotant sont normalement annoncés à distance par un avertissement qui peut lui même être précédé, en signalisation lumineuse, par un feu jaune clignotant.

Les principaux signaux d'annonce d'arrêt sont :

- L'avertissement fermé : Il commande au mécanicien d'être en mesure de s'arrêter avant le ou les signaux d'arrêts : carré ou sémaphore annoncés, ou d'observer un feu rouge clignotant.
- Le feu jaune clignotant : Il commande au mécanicien d'être en mesure de s'arrêter avant le signal annoncé à distance réduite par l'avertissement suivant.



Avertissement



Feu jaune clignotant

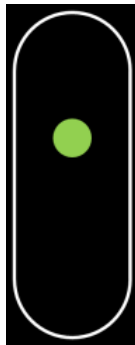
IX.4.4. Signaux d'indication de marche

Le feu vert indique au conducteur que la circulation en marche normale est autorisée, s'y rien ne s'y oppose.

Sur les sections de ligne où la vitesse des trains est supérieure à 160 km/h, un feu vert clignotant précède généralement l'avertissement ou le feu jaune clignotant.

Les principaux signaux d'indication de marche sont :

- Le feu vert : Il indique au conducteur que la circulation en marche normale est autorisée.
- Le feu vert clignotant : Sur les sections de ligne où la vitesse des trains est supérieure à 160 km/h, un feu vert clignotant précède généralement l'avertissement ou le feu jaune clignotant.



Feu vert



Feu vert clignotant

IX.4.5. Signaux de limitation de vitesse

Ils limitent à un taux déterminé la vitesse des trains sur une partie de voie ou au franchissement de certains points particuliers (aiguille, traversée de gare, etc...).

- Les limitations permanentes de vitesse :
 - Sur des parties de voie par tableau indicateur de vitesse ordinaire.
 - Au franchissement de certains points particuliers.
- Les limitations temporaires de vitesse :

Cette signalisation s'applique sur des parties de voie (chantiers de travaux, etc.) sur lesquelles une limitation temporaire de vitesse doit être observée.

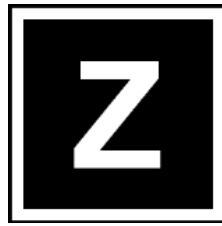
Les principaux signaux de limitation de vitesse sont :

- Le tableau indicateur de vitesse : C'est l'indication sur la vitesse à respecter.
- La pancarte Z : C'est le signal d'exécution indiquant le début de la zone à parcourir à vitesse limitée.
- La pancarte R : C'est le signal de reprise indiquant la fin de la zone à parcourir à vitesse limitée.
- Le ralentissement 30 fermé : C'est un ralentissement à 30km/h à distance.
- Le rappel 30 fermé : C'est le rappel à 30km/h qui précède l'aiguillage .

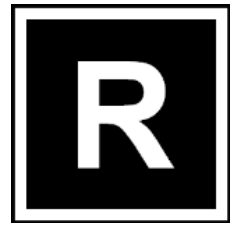
La signalisation ferroviaire.



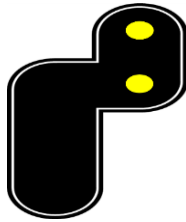
Tableau indicateur de vitesse



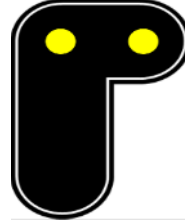
Pancarte Z



Pancarte R



Rappel 30



Ralentissement 30

IX.4.6. Signaux indicateurs de direction

Elle renseigne les conducteurs sur la direction géographique qui leur est donnée.

Les principaux signaux indicateurs de direction sont :

- Le tableau indicateur de direction à distance.
- Le tableau indicateur de direction.

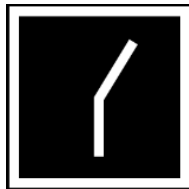


tableau indicateur de direction à distance



tableau indicateur de direction

IX.4.7. Signaux caractéristiques de prescriptions particulières

Ils renseignent les conducteurs sur des particularités.

On trouve :

- des tableaux.
- des pancartes.
- la bande lumineuse jaune.
- la croix de Saint-André (annulation des signaux).

IX.4.8. Signalisation de sortie de certains faisceaux ou groupes de voies convergentes

Elle peut être constituée de :

- chevron pointe en haut.
- tableau lumineux de correspondance.
- tableau lumineux indicateur de provenance.

IX.5. La signalisation de cabine

Avec l'avènement des trains à grande vitesse, la signalisation au sol ne permettait plus la circulation en toute sécurité, car au-delà d'une certaine vitesse, les informations qu'elle donne ne peuvent plus être perçues par le conducteur. On a donc dû inventer des systèmes où ces mêmes informations sont affichées directement dans le poste de conduite.

On peut même combiner les deux, c'est-à-dire un système de signalisation en cabine et une signalisation au sol au cas où le premier défaille, ainsi que pour les convois dont le poste de conduite n'est pas équipé du module d'affichage.

Le système transmet de manière continue (ou discontinue) en cabine de conduite des ordres et une consigne de vitesse associée éventuellement à une distance but.

La signalisation de cabine peut être complétée par une signalisation au sol dans les cas cités précédemment pour :

- Repérer les points à ne pas dépasser.
- Donner des ordres de traction électrique, des informations aux points d'entrée et de sortie du domaine de signalisation de cabine, etc.

Des pancartes ou tableaux indiquent ces ordres et informations.

Ces repères, pancartes ou tableaux sont implantés :

- à gauche de la voie sur les plateformes à une seule voie.
- côté piste, à l'extérieur sur les plateformes à deux voies.
- dans le cas de plan de voie plus complexe, les pancartes ou tableaux sont fléchés.

IX.6. Les systèmes d'espacement des trains

Contrairement aux tram-ways ou à la voiture, le besoin de gérer les distances entre chaque train est primordial. En cause :

- Un train possède une masse importante et accumule donc beaucoup d'énergie cinétique.
- Un train avance avec des roues en acier sur des rails en acier, provoquant une augmentation des distances de freinage.

Le cantonnement ferroviaire permet de résoudre ces problèmes. Il consiste en effet à espacer les trains roulant dans le même sens afin de respecter les distances de freinage. C'est un système de signalisation des infrastructures ferroviaires qui permet d'assurer la circulation de plusieurs trains sur une même voie tout en évitant les risques de rattrapages.

Sur le terrain, la voie ferrée est scindée en portions appelées « cantons », sur lesquelles un signal d'entrée (le plus souvent un feu tricolore) est placé. L'idée : limiter la circulation à un seul train par canton. La longueur d'un canton étant plus grande que la distance nécessaire au freinage, la sécurité est garantie.

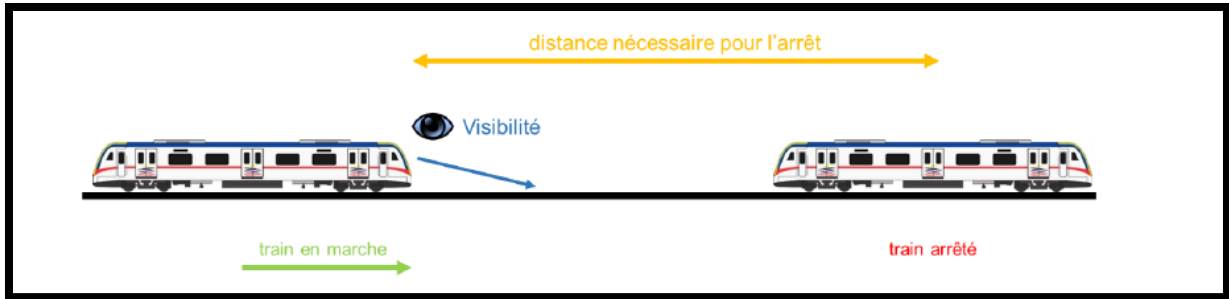


Figure IX.1. Schéma explicatif du principe de cantonnement.

IX.6.1. Les différents modes de cantonnement

IX.6.1.1. Les blocks manuels

On distingue deux types de block manuel (BM) :

- Le cantonnement téléphonique : les deux postes encadrant le canton sont reliés par téléphone, le garde du poste amont rouvre le signal d'entrée du canton qui peut-être simplement un signal d'arrêt à main, lorsque le garde du poste aval l'avise du dégagement, par la totalité du train, du canton intéressé.
- Les blocks par appareils ou blocks enclenchés : les deux postes encadrant le canton, reliés par une liaison électrique, sont dotés d'appareillages électromécaniques commandés manuellement, mais dotés de certains enclenchements, le levier du signal d'entrée est enclenché électro-mécaniquement à la fermeture lorsque le canton est occupé. La libération, envoyée électriquement par action manuelle du poste aval, est généralement subordonnée à un contrôle électrique de passage de la circulation.

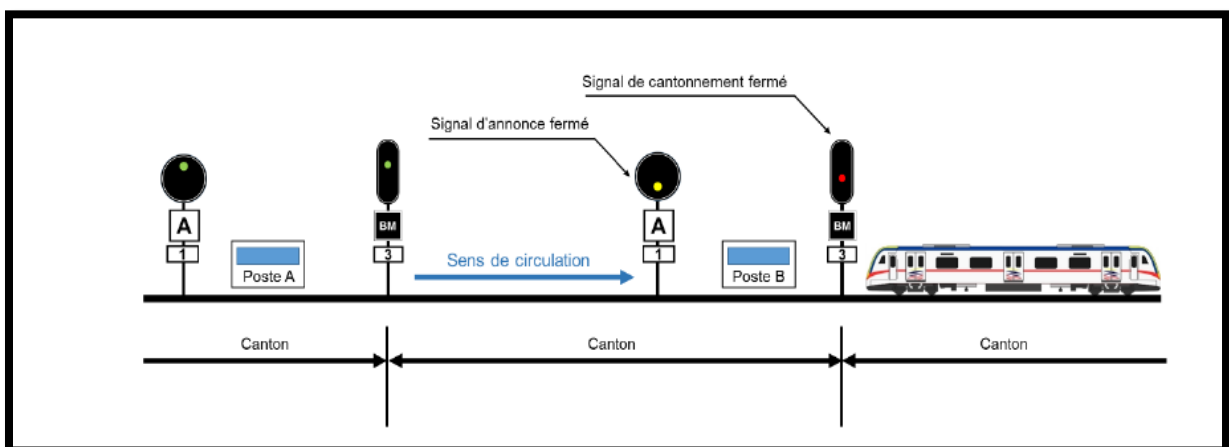


Figure IX.2. Schéma explicatif du block manuel.

IX.6.1.2. Les blocks automatiques

Il existe deux types de block automatique :

- Le block automatique lumineux permissif à cantons courts (BAL) : installé lorsque le trafic journalier approche ou dépasse pour le total des deux sens de circulation une centaine de mouvements sur les lignes à double voie, une quarantaine de mouvements sur les lignes à une seule voie, c'est un système automatique qui représente des avantages de sécurité par rapport au block manuel (risque d'erreur humaine diminué), les cantons sont courts et les espacements des trains sont réduits (1 500m sur un ligne de 160km/h), il est donc plus couteux (plus de signaux).
- Le block automatique à permissivité restreinte (BAPR) : utilisé sur des lignes secondaires ou les lignes à moindre débit où les cantons sont longs et les espacements des trains sont plus importants (jusqu'à 15km ou plus).

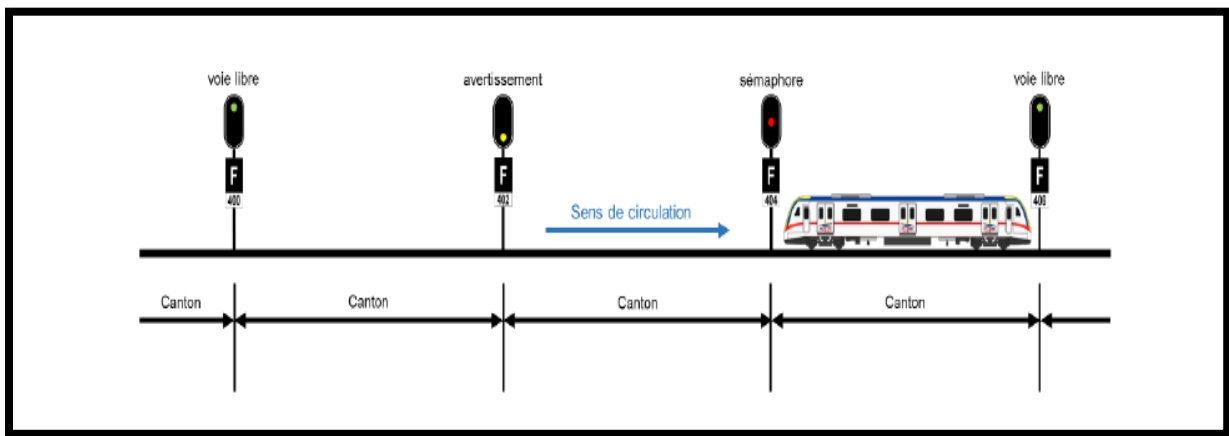


Figure IX.3. Schéma explicatif du block automatique.

IX.7.Conclusion

Dans ce chapitre j'ai exposé les principes généraux relatifs à la signalisation et aux différents systèmes d'espacement des trains. Ces derniers sont des éléments de base de la sécurité ferroviaire. La sécurité et l'efficacité ainsi que la modernisation sont des objectifs qu'on veut atteint à travers les systèmes de signalisation choisis.

CHAPITRE X : DEVIS ESTIMATIF ET QUANTITATIF.

Tableau 0.1. Devis estimatif et quantitatif.

Article	Désignation	Unité	Prix unitaire	Quantité	Montant
1	INSTALLATION GENERALE DE CHANTIER				
1.1	Installation générale de chantier	F			134 837 183.10
2	TERRASSEMENT				
2.1	Déblais mise en remblai	m ³	750	62397.48	46 798 110.00
2.2	Déblais mise en dépôt	m ³	550	351110.62	193 110 841.00
2.3	Déblais en terrain rocheux rippable mis en remblai	m ³	1 200	30287.38	36 344 856.00
2.4	Remblai provenant des zones d'emprunt agréées<10km	m ³	950	632924.79	601 278 550.50
2.5	Couche de forme	m ³	1400	54750.00	76 650 000.00
2.6	Couche de sous ballast	m ³	2 750	23268.75	63 989 062.50
TOTAL H.T					1 018 171 420.00
3	TRAVAUX DE LA VOIE				
3.1	Fourniture et pose de rail UIC 60-E1	m	7 301	26 482	193 345 082.00
3.2	Fourniture et pose de traverse bi-bloc	U	9 525	22 068.3	210 200 557.50
3.3	Fourniture et pose d'appareil de voie 1/9 UIC 60 – 300	U	13 100 000	2	26 200 000.00
3.4	Fourniture et pose d'appareil de voie 1/12 UIC 60 – 500	U	14 400 000	4	57 600 000.00
3.5	Fourniture et pose de ballast et ballastage de voie nouvelle	m ³	4 000	8005.40	32 021 600.00
3.6	Soudage aluminothermique	U	12 300	1 471.23	18 096 129.00
TOTAL H.T					537 463 368.50
4	ASSAINISSEMENT ET OUVRAGES DE DRAINAGE				

4.1	Fossés trapézoïdaux en béton armé	m	6 500	19 110	124 215 000.00
4.2	Tuyaux en béton arme diamètre 1000 mm	m	21 000	25	525 000.00
4.3	Tuyaux en béton arme diamètre 1200 mm	m	36 000	27.5	990 000.00
4.4	Tête des buses pour tuyaux diamètre 1000 mm	U	137 000	10	1 370 000.00
4.5	Tête des buses pour tuyaux diamètre 1200 mm	U	195 000	14	2 730 000.00
TOTAL H.T					129 830 000.00
5	AMENAGEMENT DES GARES				
5.1	Estimation du coût des travaux de la gare				290 751 936.00
6	SIGNALISATION				
6.1	Estimation du coût d'installation des différents signaux				105 552 696.00
TOTAL FINAL H.T (HORS TAXES)					2 216 606 603.60
TVA (TAXES SUR LA VALEUR AJOUTEE 19%)					421 155 254.70
TOTAL FINAL TTC (TOUTES TAXES COMPRISES)					2 637 761 858.30

Le montant total du projet en toutes taxes comprises s'élevé à deux milliards, six cent trente-sept millions, sept cent soixante et un milles et huit cent cinquante-huit Dinars Algériens.

CONCLUSION GENERALE.

Conclusion générale

L'évolution et l'amélioration des infrastructures de transport jouent un rôle important dans le développement de n'importe quel pays, le secteur de transport ferroviaire étant l'un des moyens de transport les plus nécessaires, son développement devient une priorité.

Dans ce mémoire on a fait l'étude d'avant-projet détaillé d'un tronçon de la nouvelle ligne ferroviaire reliant la nouvelle ville de Boughezzoul et M'sila, sur un linéaire de 11km, débutant du PK160+000 jusqu'au PK171+000. Nous avons commencé notre étude par l'étude géométrique tout en passant par les études géologiques, géotechnique, hydraulique, la stabilité des talus...etc. Tout ça en essayant d'optimiser ces dernières en utilisant les divers normes (SNTF, UIC), logiciels (AUTOCAD, CIVIL 3D) et les connaissances acquises au cours des années d'étude supérieure.

Enfin, ce mémoire nous a donné l'opportunité de cerner tous les problèmes théoriques que peuvent se poser dans un projet ferroviaire, de les analyser, et de trouver des solutions adéquates en se basant sur une méthodologie rationnelle.

Références bibliographiques

- [1] Livre : Track Compendium, Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. Dr. Bernhard Litchtberger. Eurail press ; 2005.
- [2] Thèse de doctorat : Analyse tribologique du contact roue-rail : modélisation et expérimentations modélisation et expérimentations -Cas de l'usure ondulatoire-, Aurélien SAULOT (Ingénieur INSA Lyon) ; 2005.
- [3] Thèse de doctorat : Etude de la fatigue de contact de roulement : approche expérimentale dans un matériau fragile et modélisation numérique, Houssein ABBOUCHI , L'université de Poitiers ; 2006.
- [4] Thèse de doctorat : Etude de dégradation des voies ferrées urbaines, Si Hai MAI, L'université Paris-Est ; 2011.
- [5] Thèse de doctorat : Modélisation numérique du contact roue-rail pour l'étude des paramètres influençant les coefficients de Kalker : Application à la dynamique ferroviaire , Moncef Toumi , l'Ecole des Ponts et Chaussées ; 2017.
- [6] Agence Nationale d'Etude et de Suivre de la Réalisation des Investissements Ferroviaires, <http://anesrif.dz/>.
- [7] Wikipedia, <https://www.wikipedia.org/>.
- [8] SNTF, référentiel technique, chapitre 06, géométrie de la voie, version 2 2005.
- [9] SNTF, Référentiel technique, ouvrage en terre pour plateforme ferroviaire ; 2005 version 2.
- [10] Code UIC 703R, caractéristiques des voies parcourues par des trains, 2ème édition 1989.
- [11] Code UIC 719R, ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaires, 2ème édition 1994.
- [12] Groupement d'entreprises « GRBM », « terrassement, drainage et assainissement ».
- [13] Groupement d'entreprises « GRBM », « Note Finale de Synthèse géotechnique, géologique et hydrologique ».
- [14] Pierre CHAPAS, Technique de l'ingénieur, Voie ferrée - Composants, construction et maintenance, Réf : TRP3050 v1, Paris : Technique de l'ingénieur, 10 novembre 2012.
- [15] Rabah MORSLI, Cours voie ferrée 2eme année cycle ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics-ALGER. 2018/2019.
- [16] Agence Nationale des Ressources Hydriques, <http://www.anrh.dz/cartes.html>.
- [17] Daoudi RAHMANI, Cours hydraulique 1ere année cycle ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics-ALGER, 2017/2018.
- [18] Groupement Rail Boughezoul M'sila (GRBM) Etude d'exécution : Dossier 301.2 - Drainage et Assainissement.
- [19] Groupement Rail Boughezoul M'sila (GRBM) Etude d'exécution : Dossier 301.4 - Gares - Plans de Masse.

[20] Roger RETIVEAU, La signalisation ferroviaire, Paris, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, 1987.

[21] Etablissement Public de la Sécurité Ferroviaire, Les signaux, Les régimes d'exploitation des lignes, Les systèmes d'espacement des trains, Amiens, Edition 5 Juillet 2017.

ANNEXES

Annexe A.1

Listing d'abscisse curviligne :

N°	Type	A	Longueur	Abscisse curviligne de départ	Abscisse curviligne de fin	Type de clothoïde	Rayon	Longueur de la corde
1	Ligne		2582.411m	160+000.00m	162+582.41m			
2.1	Clothoïde-Courbe-Clothoïde	547.723m	200.000m	162+582.41m	162+782.41m	Simple		
2.2	Clothoïde-Courbe-Clothoïde		154.440m	162+782.41m	162+936.85m		1500.000m	154.372m
2.3	Clothoïde-Courbe-Clothoïde	547.723m	200.000m	162+936.85m	163+136.85m	Simple		
3	Ligne		596.615m	163+136.85m	163+733.47m			
4.1	Clothoïde-Courbe-Clothoïde	565.685m	200.000m	163+733.47m	163+933.47m	Simple		
4.2	Clothoïde-Courbe-Clothoïde		223.104m	163+933.47m	164+156.57m		1600.000m	222.923m
4.3	Clothoïde-Courbe-Clothoïde	565.685m	200.000m	164+156.57m	164+356.57m	Simple		
5	Ligne		798.747m	164+356.57m	165+155.32m			
6.1	Clothoïde-Courbe-Clothoïde	504.975m	63.750m	165+155.32m	165+219.07m	Simple		
6.2	Clothoïde-Courbe-Clothoïde		123.037m	165+219.07m	165+342.10m		4000.000m	123.032m
6.3	Clothoïde-Courbe-Clothoïde	504.975m	63.750m	165+342.10m	165+405.85m	Simple		
7	Ligne		5593.566m	165+405.85m	171+000m			

Annexe A.2

Listing du profil en long.

N°	Abscisse du PIV	Altitude du PIV	Pente d'entrée	Pente de sortie	A (changement de pente)	Type de courbe de la ligne de profil en long	Valeur K	Type de sous-entité	Longueur de la courbe de la ligne de profil en long	Rayon de la courbe
1	160+000.00m	689.904m		0.62%						
2	164+867.86m	720.178m	0.62%	0.77%	0.15%	Point bas	100.000	Parabole symétrique	15.152m	10000.000m
3	168+057.68m	744.850m	0.77%	0.22%	0.55%	Point haut	150.000	Parabole symétrique	82.887m	15000.000m
4	169+176.39m	747.321m	0.22%	0.00%	0.22%	Point haut	200.000	Parabole symétrique	43.783m	20000.000m
5	171+000.00m	747.357m	0.00%							

Annexe B.1

Résultats des essais au laboratoire sur les échantillons remaniés.

Puits	Localisation (PK)	Profondeur de l'échantillon	Formation	Identification physique.				Compactage			CBR _{95%}
				%<80μ	W _n (%)	LL (%)	IP (%)	Type	W _{OPN} (%)	γ _{dmax} (T/m ³)	
P14-3	160+280	0.8-1.3	Qt	50	6	31	12	-	-	-	-
P15-3	164+100	1.6-1.9	Qt	26	9	38	16	-	-	-	-
P16-3	167+025	0.8-1.2	E	25	8	43	20	Normal	18	1.64	22
								Modifié	15	1.74	
P17-3	168+040	1.6-1.9	Qt	17	8	42	20	-	-	-	-
P18-3	168+616	1.5-1.9	Qt	29	10	39	18	-	-	-	-
P19-3	168+802	1.2-1.8	Qt	75	11	40	18	-	-	-	-

Puits	Localisation (PK)	Profondeur de l'échantillon	Formation	VBS (g/100g)	Equivalent de sable (%)	Indice de consistance (%)	Analyse chimique.		
							Sulfates (SO ₄ -)	Chlorures (Cl-)	Carbonates (CaCO ₃)
P14-3	160+280	0.8-1.3	Qt	0.88	6	2.2	-	-	-
P15-3	164+100	1.6-1.9	Qt	0.32	19	1.8	-	-	-
P16-3	167+025	0.8-1.2	E	0.29	25	1.7	0	Traces	54.2
P17-3	168+040	1.6-1.9	Qt	0.27	24	1.7	-	-	-
P18-3	168+616	1.5-1.9	Qt	0.58	8	1.7	-	-	-
P19-3	168+802	1.2-1.8	Qt	1.32	5	1.6	-	-	-

Annexe B.2

Résultats des essais au laboratoire sur les échantillons intacts :

Sondage	Localisation (PK)	Profondeur de l'échantillon	Formation	Identification physique.				γ_s (T/m ³)	γ_h (T/m ³)	Essai de cisaillement	
				%<80 μ	W _n (%)	LL (%)	IP (%)			C _u (bars)	Φ (Degrés)
S 7-3	170+173	2.7-3.0	Qt	39	-	29	11	1.85	2.06	0	27

Sondage	Localisation (PK)	Profondeur de l'échantillon	Formation	Analyse chimique		
				Sulfates (SO ₄ -)	Chlorures (Cl-)	Carbonates (CaCO ₃)
S 7-3	170+173	2.7-3.0	Qt	0	0.17	30.13

Annexe B.3

Classifications des sols selon UIC (POUR LA PLATEFORME) :

La qualité de sol pour la plateforme dépend des deux paramètres ci-après :

- La nature géotechnique du sol, à cet égard, on utilise l'identification géotechnique.
- Les conditions hydrogéologiques et hydrologiques locales.

On distingue, selon que les conditions ci-dessus soient bonnes ou mauvaises, les quatre classes de qualité QSi de sols ci-après :

Classe de qualité de sol	Classification des sols (identification géotechnique)
QS0 Sols impropres	0.1 sols organiques. 0.2 sols fins (comportant plus de 15% de fines) foisonné, humides et donc non compactables. 0.3 sols comportant des matériaux solubles (sel gemme ou gypse) 0.5 sols comportant des matériaux polluants (déchets industriels par exemple). 0.6 sols mixtes « minéraux organique ».
QS1 Sols médiocres	1.1 Sols comportant plus de 40 % de fines (sauf sols 0.2). 1.2 Roches très évolutives par exemple : - Craies de $\rho_d < 1.7 \text{ t/m}^3$ et de friabilité forte – Marnes - Schistes altérés. 1.3 Sols comportant de 15 à 40 % de fines (sauf sols 0.2). 1.4 Roches évolutives par exemple : - Craies de $\rho_d < 1.7 \text{ t/m}^3$ et de friabilité faible - Schistes non altérés 1.5 Roches tendres par exemple : Si Micro-deval en présence d' eau (MDE) > 40 et Los Angeles LA > 40.
QS2 Sols moyens	2.1 Sol comportant de 5 à 15% de fines. 2.2 Sols comportant moins de 5% de fines mais uniformes ($C_u \leq 6$). 2.3 Roches moyennement dures par exemple : Si $25 < \text{MDE} \leq 40$ et $30 < \text{LA} \leq 40$
QS3 Bons sols	3.1 Sols comportant moins de 5% de fines 3.2 Roches dures par exemples : Si $\text{MDE} \leq 25$ et $\text{LA} \leq 30$

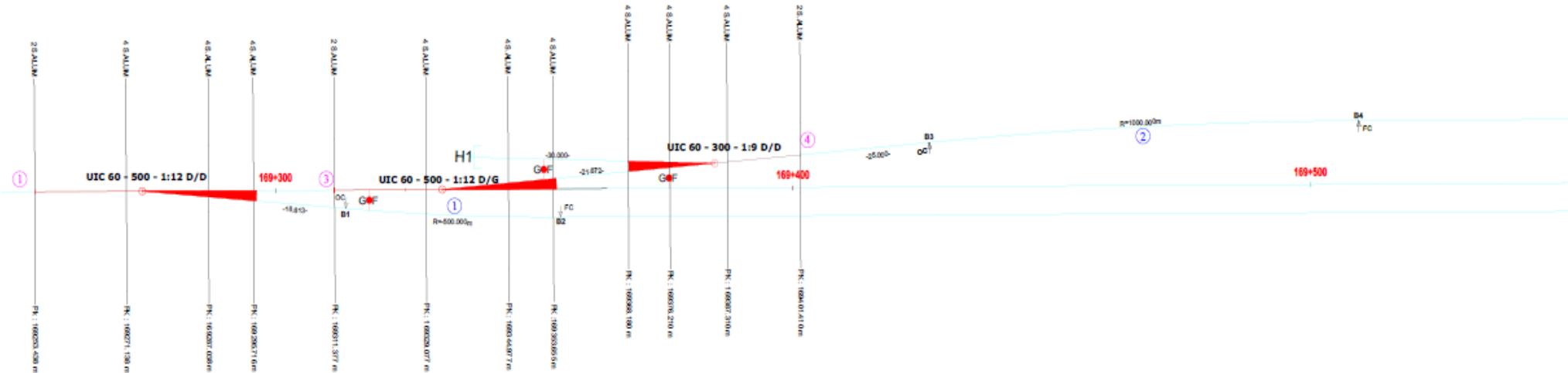
Annexe C.1

Plan de pose des appareils de voie du PK 169+200 au PK 169+500

N	Traverse de 2.40% 20% 15m	6
M	Traverse de 4.80% 20% 15m	4
L	Traverse de 4.40% 20% 15m	5
K	Traverse de 4.20% 20% 15m	4
J	Traverse de 4.00% 20% 15m	5
H	Traverse de 3.80% 20% 15m	5
G	Traverse de 3.60% 20% 15m	5
E	Traverse de 3.40% 20% 15m	5
D	Traverse de 3.20% 20% 15m	7
C	Traverse de 3.00% 20% 15m	8
B	Traverse de 2.80% 20% 15m	11
A	Traverse de 2.60% 20% 15m	23

N	Traverse de 2.40% 20% 15m	6
M	Traverse de 4.80% 20% 15m	4
L	Traverse de 4.40% 20% 15m	5
K	Traverse de 4.20% 20% 15m	4
J	Traverse de 4.00% 20% 15m	5
H	Traverse de 3.80% 20% 15m	5
G	Traverse de 3.60% 20% 15m	5
E	Traverse de 3.40% 20% 15m	5
D	Traverse de 3.20% 20% 15m	7
C	Traverse de 3.00% 20% 15m	8
B	Traverse de 2.80% 20% 15m	11
A	Traverse de 2.60% 20% 15m	23

O	Traverse de 2.00% 20% 15m	4
N	Traverse de 2.40% 20% 15m	10
M	Traverse de 4.80% 20% 15m	3
L	Traverse de 4.40% 20% 15m	3
K	Traverse de 4.20% 20% 15m	3
J	Traverse de 4.00% 20% 15m	4
H	Traverse de 3.80% 20% 15m	4
G	Traverse de 3.60% 20% 15m	4
E	Traverse de 3.40% 20% 15m	4
D	Traverse de 3.20% 20% 15m	5
C	Traverse de 3.00% 20% 15m	7
B	Traverse de 2.80% 20% 15m	10
A	Traverse de 2.60% 20% 15m	18



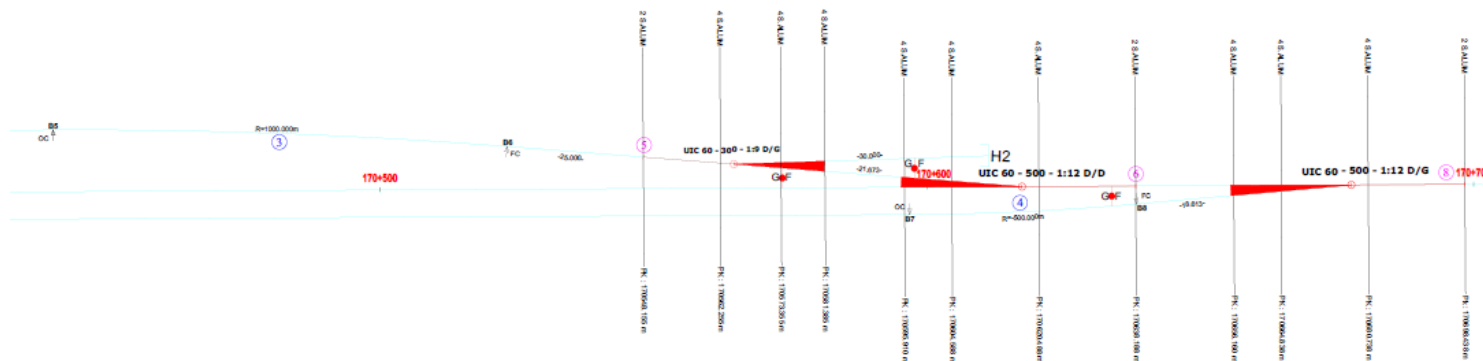
Plan de pose des appareils de voie du PK170+300 au PK170+700.

GARE DE BIRINE
Pk 169+253.439 au Pk 170+698.439

O	Troisème de 2,20% 20% 15m	4
N	Troisème de 2,40% 20% 15m	10
M	Troisème de 4,60% 20% 15m	
L	Troisème de 4,80% 20% 15m	3
K	Troisème de 4,30% 20% 15m	3
J	Troisème de 4,50% 20% 15m	4
H	Troisème de 3,80% 20% 15m	4
G	Troisème de 3,80% 20% 15m	4
E	Troisème de 3,40% 20% 15m	4
D	Troisème de 3,20% 20% 15m	5
C	Troisème de 3,20% 20% 15m	7
B	Troisème de 2,8% 20% 15m	10
A	Troisème de 2,8% 20% 15m	18

N	Tasa de 2.40% 20% 15n	6
M	Tasa de 4.80% 20% 15n	4
L	Tasa de 4.80% 20% 15n	4
K	Tasa de 4.20% 20% 15n	4
J	Tasa de 4.00% 20% 15n	5
H	Tasa de 3.60% 20% 15n	5
G	Tasa de 3.60% 20% 15n	5
E	Tasa de 3.40% 20% 15n	5
D	Tasa de 3.20% 20% 15n	7
C	Tasa de 3.00% 20% 15n	8
B	Tasa de 2.80% 20% 15n	1
A	Tasa de 2.60% 20% 15n	2

N	Trova-se de 2.400 a 200.15m
M	Trova-se de 4.600 a 200.15m
L	Trova-se de 4.600 a 200.15m
K	Trova-se de 4.200 a 200.15m
J	Trova-se de 4.000 a 200.15m
H	Trova-se de 3.800 a 200.15m
G	Trova-se de 3.600 a 200.15m
E	Trova-se de 3.400 a 200.15m
D	Trova-se de 3.200 a 200.15m
C	Trova-se de 3.000 a 200.15m
B	Trova-se de 2.800 a 200.15m
A	Trova-se de 2.600 a 200.15m



Plan d'aménagement de la gare de Birine.

