République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المـــدرســـة الوطنيـــة العليـــا للأشغـال العموميـة

فرنسيس جانسون

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Francis Jeanson

Mémoire

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

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Infrastructures de Base

Thème

Étude en APD de la nouvelle ligne ferroviaire minière Béchar-Tindouf- Gara Djebilet du PK 255+000 au PK 270+000 avec la conception d'une gare de croisement

Présenté par :

KEDDANI Nassima

Encadré par :

M. BOUDADI Abed Mustapha

M^{me} CHIALI Soumiya

Promotion 2024/2025

© ENSTP-FJ - Garidi - Vieux Kouba

Résume

Le présent projet s'inscrit dans le cadre de la conception et de l'étude technique approfondie d'un tronçon de la future ligne ferroviaire minière reliant Tindouf à Béchar via Gara Djebilet. L'étude porte spécifiquement sur le segment compris entre les points kilométriques PK 255+000 et PK 270+000, et intègre la conception de la gare de croisement située sur ce tracé.

Le projet a été développé en conformité avec les normes établies par l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) et selon les prescriptions techniques de la Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF), afin d'assurer la compatibilité et la performance du système ferroviaire envisagé.

La modélisation du tracé a été effectuée à l'aide de logiciels spécialisés (Civil 3D, AutoCAD 2024, Google Earth), assurant une conception précise et conforme aux standards ferroviaires actuels.

Mots clés : Voie ferrée, Ligne minière, Gara Djebilet, Traverse, Rail, Appareil de voie, Garage franc.

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى إعداد دراسة تفصيلية لمقطع من الخط الحديدي المنجمي الرابط بين تندوف وبشار عبر غارة جبيلات، وذلك في إطار إعداد دراسة تصميمية من نوع (APD) تشمل التحديث، التوسعة وتصحيح مسار السكة. يمتد المقطع المدروس من النقطة الكيلومترية PK 255+000 إلى PK 270+000، ويتضمن تصميم محطة تقاطع واقعة ضمن هذا المسار.

يرتكز المشروع على تحديد الخصائص التقنية المثلى لمسار السكة الحديدية، مع الاعتماد على توصيات الشركة الوطنية للنقل بالسكك الحديدية (SNTF)، والمعايير المعتمدة من طرف الاتحاد الدولي للسكك الحديدية (UIC)، لضمان مطابقة الشبكة للمقاييس الحديثة.

تمت نمذجة التصميم الهندسي والجغرافي للمشروع باستخدام برامج متخصصة مثل Autodesk Civil 3D 2024، AutoCAD 2024 و Google Earth، مما سمح بتحقيق دقة عالية في التصميم واستجابة للمعايير التقنية المعتمدة.

المصطلحات الرئيسية: خط سكة منجمي، خط تندوف – بشار، غار جبيلات، سكة، عارضة، جهاز السكة، مرآب قطار

Summary

This study presents the detailed design (APD) of a segment of the future mining railway connecting Tindouf to Béchar via Gara Djebilet. The section from PK 255+000 to PK 270+000 includes the design of a crossing station.

The project adheres to SNTF guidelines and UIC standards, aiming to define the optimal technical specifications for the alignment. Geometric modeling was performed using Autodesk Civil 3D 2024, AutoCAD 2024, and Google Earth, ensuring accuracy and compliance with modern railway requirements.

Keywords: mining railway, Tindouf–Béchar, Gara Djebilet, crossing station, rail, sleeper, turnout, siding.

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers *Allah*, qui m'a accordée la force, la patience et la clarté d'esprit nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa guidance, ce projet n'aurait pas pu voir le jour.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mes parents et à ma famille. Leur présence rassurante et leurs encouragements constants ont été une source inestimable de motivation et de stabilité tout au long de mon parcours. Ce travail est aussi le fruit de leur soutien silencieux et de leur confiance indéfectible.

Je tiens à remercier sincèrement **Monsieur M. Boudadi**, ingénieur d'études chez **SETO**, ainsi que **Madame S. Chiali**, pour leur encadrement de grande qualité, leur disponibilité généreuse et leur confiance tout au long de ce projet. Leur rigueur professionnelle, la pertinence de leurs conseils et leur accompagnement attentif ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Ma reconnaissance s'étend également à **Messieurs Amar, Azzaz, Ikhlef, Saib**, ainsi qu'à **EL FEKAIR Djouad**, **Mesmoudi Walid**, **Aït Yahia Rayane**, **Bouhali Nasro**, **Ibrahim**, **Zakaria** et **Abdi**, ingénieurs au sein de **SETO**, pour leur accueil chaleureux, leur écoute bienveillante et la richesse de nos échanges. Grâce à eux, ce stage a été une expérience formatrice à la fois humaine et professionnelle. Je n'oublie pas de remercier l'ensemble du personnel de **SETO**, dont l'accompagnement quotidien a fortement contribué à la qualité de mon intégration et de mon apprentissage.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble de mes enseignants, qui ont su, par leur engagement et leur exigence, me transmettre les compétences nécessaires à la réalisation de ce travail. Mes remerciements vont particulièrement à **Madame Y. Mahiaoui**, **Monsieur F. Fedghouche**, **Monsieur K. Hammadi** et **Monsieur Morsli**, pour leurs enseignements éclairants, leurs remarques constructives et leur soutien constant.

J'adresse aussi mes remerciements au personnel administratif de l'**ENSTP**, notamment à **M^{me} Bourebia** et **M^{me} Makoudi**, pour leur disponibilité, leur réactivité et leur accompagnement efficace tout au long de ce parcours.

Enfin, je remercie sincèrement les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail, pour le temps qu'ils lui ont consacré, et pour la richesse de leurs remarques et suggestions, qui ne manqueront pas d'en approfondir la portée.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À ma mère, lumière constante de mon parcours, pour son amour infini, sa patience silencieuse et sa force douce. Rien de ce que j'ai accompli n'aurait été possible sans elle.

À mon père, toujours présent dans mon cœur et dans chacun de mes pas ; cette réussite lui est dédiée.

À mes sœurs : **Nour**, ma lumière dans l'ombre, dont la présence douce et les mots justes ont su me réconforter même dans le doute ; **Amina**, au cœur généreux, pour ses encouragements discrets mais puissants, et cette confiance qui m'a portée plus que je ne saurais l'exprimer ; et **ma petite Leïla**, source pure d'énergie et de bonheur, dont le sourire suffit à illuminer mes journées.

À Monsieur Mustapha, pour la richesse humaine et intellectuelle de son encadrement.

À mes amies de cœur, Chaïma, Hasna, Marwa, pour leur présence, leur écoute et leur bienveillance, qui ont apporté une lumière particulière à mon quotidien.

À Ryad, pour sa disponibilité, sa générosité et sa présence sans faille dans les moments où j'en avais besoin.

À Madame Chiali, pour sa bienveillance exigeante et son professionnalisme inspirant.

Ce travail est le vôtre autant qu'il est le mien.

Nassima KEDDANI

Liste des abréviations

ADV : Appareil de voie

APD : Avant-projet détaillée

Bv : Bassin versant

C: Cohésion

CaCo3 : Calcium Carbonate

CRS : Ciment résistant aux sulfates

Cu : Coefficient d'uniformité

FPR : Fin raccordement progressive

GTR : Guide des terrassements routiers

GF : garage franc

IDF : intensité -durée – fréquence

Ip : Indice de plasticité

IP : indice de perméabilité

LA : Los Angeles

LRS : Long rail soudé

Lu : longueur utile

MDE : Micro Deval

NPHE : Niveau des plus hautes eaux

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

ERTMS : Européen railways Traffic Management System

OH : Ouvrage hydraulique

ONM : Office nation météorologie

ORP : Origine raccordement progressive

PK : Point kilométrique

PU : Puit de reconnaissance

PVC : Poly-Vinyl Chloride

Qps : Débit plein section

RN 50 : Route nationale numéro 50

RPA : Règles parasismique algériens

SC : Sondage carotté

SNTF : Société nationale du transport ferroviaire

SPT : Essai de pénétration standard

TN : terrain naturel

UIC : Union international des chemins de fer

VBS : Bleu de méthylène

Vps : vitesse pleine section

Vv : Vitesse de voyageurs

Vm : Vitesse de marchandises

PCG : Point de croisement et garage

PCVE : Point de croisement et voie d'évitement

Table des matières

Liste des figures……..……I

Lise des tableaux……..……II

Introduction générale……1

I. Histoire et évolution du chemin de fer en Algérie 3

I.1 Introduction 3

I.2 Genèse et prémices du chemin de fer en Algérie 3

I.3 Développement du chemin de fer en Algérie 4

I.3.1 Chronologie du réseau ferroviaire algérien 4

I.3.2 Développement du réseau ferroviaire algérien 4

I.4 Présentation des caractéristiques techniques du réseau ferroviaire 6

I.5 Perspectives de développement du rail en Algérie 7

I.6 Conclusion 8

II. Présentation du projet 9

II.1 Introduction 9

II.2 Ligne Minière Ouest : Oran - Gara Djebilet 9

II.3 Présentation de la zone d'étude 10

II.3.1 Relief 11

II.3.2 Climat 11

II.3.3 Sismicité 11

II.4 Présentation du projet étudié 12

II.5 Caractéristiques du projet 13

II.5.1 Caractéristiques de base 13

II.5.2 Caractéristiques de la voie 13

II.6 Conclusion 14

III. Superstructure ferroviaire 15

III.1 Introduction 15

III.2 Composants de la superstructure 15

III.2.1 Rail 16

III.2.2 Traverse 17

III.2.3 Attache 20

III.2.4 Appareils de voie 20

III.2.5 Long rail soudé 21

III.2.6 Fonctionnement d'un branchement incorporé en LRS 23

III.3 Conclusion 23

IV. Géométrie ferroviaire 24

IV.1 Introduction 24

IV.2 Tracé en plan 24

IV.2.1 Critère de limitation des paramètres du tracé 24
IV.2.2 Différents éléments du tracé en plan 25
IV.2.3 Application au projet : 26
IV.3 Profil en long 30
IV.3.1 Composantes du profil en long 30
IV.3.2 Coordination entre le profil en long et le tracé en plan 32
IV.4 Application au projet 32
IV.4.1 Conclusion 33
V. Étude hydrologique et hydraulique 35
V.1 Introduction 35
V.2 Réseau hydrographique 35
V.3 Étude hydrologique 36
V.3.1 Caractéristiques climatiques et pluviométriques 36
V.3.2 Caractéristiques morphologiques des bassins versants 40
V.3.3 Calcul des débits de crue relatifs au projet 41
V.4 Étude hydraulique 44
V.4.1 Dimensionnement des ouvrages transversaux 44
V.4.2 Dimensionnement des buses 45
V.4.3 La vérification des conditions d'auto-curage 46
V.4.4 Drainage longitudinal 48
V.5 Conclusion 51
VI. Étude géologique et géotechnique 52
VI.1 Introduction 52
VI.2 Étude géologique 52
VI.2.1 Aperçu géologique régionale 52
VI.2.2 Aperçu géologique local 53
VI.2.3 Hydrogéologie le long du tracé 53
VI.2.4 Contraintes géologiques 54
VI.3 Étude géotechnique 54
VI.3.1 Programme d'investigation géotechnique du site 55
VI.3.2 Interprétation des résultats des investigations géotechniques 58
VI.3.3 Zones à risques 60
VI.3.4 Gites d'emprunts et carrières 61
VI.4 Conclusion 61
VII. Assise ferroviaire 62
VII.1 Introduction 62
VII.2 Éléments constitutifs de l'assise ferroviaire 62
VII.2.1 Ballast 62

VII.2.2 Sous couche 63
VII.2.3 Plate-forme 64
VII.2.1 Classification des sols et des plates-formes 64
VII.2.2 Plate-forme proposée 65
VII.2.3 Couche de forme 66
VII.2.4 Calcul des épaisseurs minimales des couches d'assise 66
VII.3 Conclusion 67
VIII. Profil en travers 68
VIII.1 Introduction 68
VIII.2 Profil en travers ferroviaire 68
VIII.2.1 Définition 68
VIII.2.2 Différents types de profils en travers 68
VIII.2.3 Éléments du profil en travers 69
VIII.3 Profil en travers du projet étudié 69
VIII.4 Calcul des cubatures 70
VIII.5 Conclusion 71
IX. Terrassement et ouvrages 72
IX.1 Introduction 72
IX.2 Terrassement 72
IX.2.1 Remblai 72
IX.2.2 Déblai 73
IX.2.3 Stabilité des talus 73
IX.3 Contraintes Techniques 75
IX.4 Ouvrage d'art 75
IX.5 Application au projet étudié 75
IX.6 Conclusion 76
X. Conception de la gare 77
X.1 Introduction 77
X.2 Différents types de gares 77
X.1 Étude du plan de masse et choix optimal du site d'une gare Ferroviaire 77
X.2 Point de Croisement et Garage 78
X.2.1 Définitions 78
X.2.2 Caractéristiques techniques des PCG 78
X.2.3 Étude des caractéristiques et conditions de conception d'une gare de croisement ferroviaire 78
X.3 Application au projet étudié 80
X.4 Assainissement longitudinal de la gare 81
X.5 Conclusion 81

XI. Étude d'impact sur l'environnement 82
XI.1 Introduction 82
XI.2 Présentation initiale de la zone d'étude 82
XI.2.1 Environnement physique 82
XI.2.2 Environnement biologique 83
XI.2.3 Environnement humain 83
XI.3 Identification et description des impacts 84
XI.3.1 Impacts positifs du projet 84
XI.3.2 Impacts négatifs du projet 84
XI.4 Mesures prises pour minimiser les impacts environnementaux du projet 85
XI.5 Risques majeurs 86
XI.6 Conclusion 87
XII. Signalisation ferroviaire 88
XII.1 Introduction 88
XII.2 Types de signalisation 88
XII.3 Principe de base de cantonnement (systèmes d'espacement des trains) 89
XII.4 Compteur d'Essieux 90
XII.5 Classification de signalisation ferroviaire 91
XII.6 ERTMS : un système moderne pour la signalisation ferroviaire 93
XII.7 Application au projet 94
XII.8 Conclusion 94
XIII. Devis quantitatif et estimatif 95
XIII.1 Introduction 95
XIII.2 Application au projet étudié 95
XIII.3 Conclusion 96
Conclusion Générale 97

Liste des Figures

Figure I.1: Localisation de la ligne minière 1
Figure I.1 : Réseau ferroviaire algérien [avant 1962] 3
Figure I.2 : Chronologie du réseau ferroviaire Algérien [1942] 4
Figure I.3 : Projet du transsaharien [Méditerranée-Niger 1947] 6
Figure II.1 : Ligne minière ouest 9
Figure II.2 : Zone du projet 10
Figure II.3 : Limites administratives de la wilaya de BECHAR et de la wilaya de BENI ABBES 11
Figure II.4 : Situation administrative de 11
Figure II.5 : Carte de zonage sismique de l'Algérie (RPA 2024) 12
Figure II.6 : Présentation de l'axe du projet sur site par Google Earth 13
Figure III.1 : Composants de la voie du projet 15
Figure III.2 : Profil rail du type 17
Figure III.3 : Traverse métallique 18
Figure III.4 : Traverse en béton MONOBLOC 19
Figure III.5 : Traverse en béton BIBLOC 19
Figure III.6 : Traverse en Bois 20
Figure III.7 : Système d'attache 20
Figure III.8 : Composants de appareil de voie 21
Figure III.9 : Soudage électrique 22
Figure III.10 : Soudage aluminothermique 22
Figure IV.1 : Eléments géométriques du tracé en plan 25
Figure V.1 : Réseaux hydrographique da la zone d'étude 35
Figure V.2 : Température Moyenne durant la période 1991 – 2021 36
Figure V.3 : Carte pluviométrique du Sud-Ouest algérien (ANRH 1995) 37
Figure V.4 : Précipitations annuelles dans la wilaya de Béchar de 1995 à 2014 37
Figure V.5 : Ajustement à la loi de Gumbel des pluies journalières maximales 38
Figure V.6 : Courbe IDF 39
Figure V.7 : Délimitation des bassins versants sur les cartes d'état-major (Civil 3D) 40
Figure V.8 : Ouvrage hydraulique (buse) 45
Figure V.9 : Fossé trapézoïdal type 01 50
Figure VI.1 : Extrait de la carte géologique de la région 52
Figure VI.2 : Carte hydrogéologique du Sahara algérien d'après (Mehdid A.1988) 53
Figure VII.1 : Composantes des voies ferrées ballastées 62
Figure VII.2 : Schéma des épaisseurs des couches d'assise du projet 67
Figure IX.1: Stabilisation d'un remblai (s) 74
Figure IX.2 : Stabilisation d'un remblai (statique) 74
Figure IX.3 : Stabilisation d'un déblai (sismique) 74
Figure IX.4 : Stabilisation d'un déblai (statique) 74
Figure X.1 : Schéma de garage franc 79
Figure X.2 : Schéma de garage franc 79
Figure X.3 : Schéma de longueur utile 79
Figure X.4 : Schéma d'heurtoir 79
Figure X.5 : Schéma de PCG du projet étudié 80
Figure XII.1 : Principe de sécurité du cantonnement ferroviaire 89
Figure XII.2 : Principe du compteur d'essieu 90

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques techniques du réseau ferroviaire algérien 6
Tableau II.1 : Aspects positifs et obstacles du projet 9
Tableau IV.1 : Tableau synthétique des composantes du tracé horizontal 25
Tableau IV.2 : Paramètres géométriques du tracé en plan selon SNTF 26
Tableau IV.3 : Application numérique des paramètres géométriques du tracé en plan 26
Tableau IV.4 : Vérification de la longueur de raccordement progressif (Lrp) 28
Tableau IV.5 : Récapitulatif des paramètres du tracé 28
Tableau IV.6 : Longueurs minimales des déclivités 31
Tableau IV.7 : Valeurs de rayon vertical minimal 32
Tableau IV.8 : Paramètres géométriques de profil en long (SNTF) 32
Tableau IV.9 : Limites appliquées au profil en long 32
Tableau V.1 : Température Moyenne durant la période 1991 – 2021 36
Tableau V.2 : Répartition annuelle des précipitations de la wilaya de Béchar 37
Tableau V.3 : Précipitations maximales journalières (Source ONM) 38
Tableau V.4 : Caractéristiques climatiques de la station de Béchar 38
Tableau V.5 : Pluies journalières maximales fréquentielles 39
Tableau V.6 : Paramètres de Montana sur différentes période de retour 39
Tableau V.7 :Valeurs des intensités en mm/h 39
Tableau V.8 : Caractéristiques des bassins versants du tronçon étudié 41
Tableau V.9 : Valeurs de C1, C2 et C 3 42
Tableau V.10 : Calcul des débits de crue pour le présent projet 43
Tableau V.11 : Vérification des conditions d'auto-curage de l'ouvrage (BV N°8) 46
Tableau V.12 : Dimensionnement des buses projetées pour le présent projet 46
Tableau V.13 : Vérification hydraulique de l'auto-curage des buses projetées 47
Tableau V.14 : Liste des ouvrages à projeter 47
Tableau V.15 : Dimensions du fossé Type 1 50
Tableau V.16 : Calcul du débit évacuer dans le cas le plus défavorable 50
Tableau VI.1 : Description géologique de tronçon étudié 53
Tableau VI.2 : Méthodes usuelles de reconnaissance géotechnique 54
Tableau VI.3 : Essais de reconnaissance in situ 55
Tableau VI.4 : Essais au laboratoire sur les échantillons prélevés 56
Tableau VI.5 : Résultats des puits de reconnaissance 56
Tableau VI.6 : Résultats des sondage carottés 57
Tableau VI.7 : Résultats des essais de laboratoire réaliser sur les puits 59
Tableau VI.8 : Résultats des essais de laboratoire réalisés sur les échantillons des sondages carottés 59
Tableau VI.9 : Présentation des zones à risques 60
Tableau VI.10 : Caractéristiques et conditions d'utilisation des matériaux de gite 61
Tableau VII.1 : Classe de portance de la plateforme selon la norme UIC 719 R (réf. page 16) 65
Tableau VII.2 : Dimensionnement de la couche d'assise pour le cas étudié 66
Tableau VII.3 : Epaisseurs de la structure de la voie 67
Tableau VIII.1 : Éléments caractéristiques du profil en travers type du projet étudié 69
Tableau VIII.2 : Cubatures de terrassement et les couches d'assises 71
Tableau IX.1 : Zones en remblai 73
Tableau IX.2 : Zones en Déblai 73
Tableau IX.3 : Caractéristique de couches 74
Tableau IX.4 : Récapitulatif des pentes utilisées en remblai et en déblai 74
Tableau IX.5 : Contraintes traversées par le tracé 76
Tableau X.1 : Conditions générales de conception d'une gare de croisement 79

Tableau X.2 : Caractéristiques de PCG étudie 80
Tableau XI.1 : Ressources physiques de la zone d'étude.....82
Tableau XI.2 : Ressources humaines de la zone d'étude 83
Tableau XI.3 : Principaux impacts environnementaux et mesures proposées 85
Tableau XII.1 : Systèmes de cantonnement ferroviaire (BAL, BAPR, BM).....89
Tableau XII.2 : Signaux ferroviaires.....91
Tableau XII.3 : Niveaux du système de contrôle des trains ERTMS.....93

Introduction Générale

Introduction Générale

Le développement des infrastructures de transport constitue un levier essentiel pour l'organisation et le dynamisme économique des territoires, notamment dans des pays vastes et riches en ressources naturelles comme l'Algérie. Parmi les modes de transport disponibles, le rail se distingue par sa capacité à transporter d'importants volumes de marchandises sur de longues distances, tout en représentant une alternative plus écologique et sécurisée que d'autres moyens, comme la route.

Dans le cadre de la relance économique et pour réduire les inégalités entre les régions, l'Algérie a lancé un projet d'extension du réseau ferroviaire vers le sud-ouest du pays. Ce projet a deux objectifs principaux : ouvrir l'accès aux zones riches en ressources minières, comme celle de Gara Djebilet, et renforcer l'unité entre les différentes régions du territoire.

C'est dans cette logique que s'inscrit la construction de la ligne Béchar – Tindouf – Gara Djebilet, conçue principalement pour transporter le minerai de fer extrait dans cette zone.

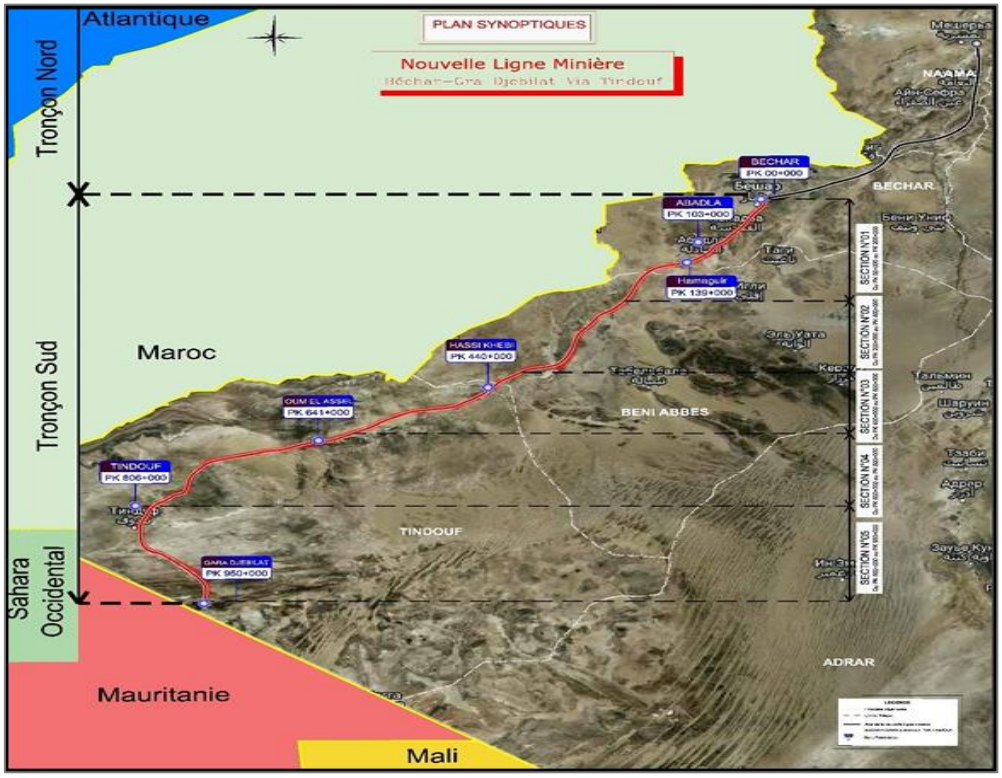


Figure I.1: Localisation de la ligne minière

Ce mémoire porte sur l'étude d'un tronçon de 15 kilomètres de la future ligne ferroviaire Béchar – Gara Djebilet, situé entre le PK 255+000 et le PK 270+000. Il comprend également la conception de la gare de croisement.

L'objectif est de proposer une solution technique fiable, respectant les normes en vigueur, et adaptée aux caractéristiques du terrain, notamment les aspects géographiques, géotechniques et environnementaux de la région traversée.

Une méthode de travail structurée a été adoptée, reposant sur l'utilisation de logiciels spécialisés (Civil 3D, InfraWorks, Geo5). L'étude s'est déroulée en plusieurs étapes :

- **Présentation du contexte ferroviaire en Algérie** : Vue d'ensemble du réseau ferroviaire, de son développement et de ses enjeux.
- **Description générale du projet Béchar – Gara Djebilet**.
- **Superstructure et géométrie de la voie** : Étude et conception du tracé ferroviaire.
- **Analyses géologiques, géotechniques et hydrauliques**.
- **Étude de l'assise ferroviaire et du profil en travers**.
- **Conception de la gare de croisement**.
- **Étude environnementale et systèmes de signalisation** : Évaluation des impacts environnementaux et des systèmes de sécurité ferroviaire.
- **Élaboration d'un devis quantitatif et estimatif**.

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de professionnalisation, alliant théorie et pratique, au service d'un projet national structurant pour le développement du territoire.

CHAPITRE I

Histoire et évolution du chemin de fer en Algérie

I. Histoire et évolution du chemin de fer en Algérie

I.1 Introduction

Ce chapitre propose un inventaire du patrimoine ferroviaire algérien des XIX^{e} et XX^{e} siècles, en mettant en lumière l'histoire méconnue de ses lignes et infrastructures. À travers une chronologie détaillée, il retrace la naissance et l'évolution du réseau ferré, depuis les premiers projets coloniaux jusqu'aux développements récents.

I.2 Genèse et prémices du chemin de fer en Algérie

Avant l'arrivée des Français en 1830, l'Algérie ne disposait pas de réseau de transport moderne. Les déplacements se faisaient principalement à pied ou à dos d'animal sur des pistes souvent difficiles d'accès. La colonisation modifie cette situation, car la France, afin de contrôler le territoire et favoriser l'installation des colons, cherche à développer des infrastructures, notamment des chemins de fer.

Dès 1833, des initiatives privées comme celle d'Émile Pereire, soutenue par la famille Rothschild, apparaissent. Mais le gouvernement français, indécis sur sa politique algérienne, hésite à s'engager financièrement. Dans les années 1840, plusieurs propositions pour relier les grandes villes, telles qu'Alger à Blida, Constantine à Skikda, ou Oran à Tlemcen, sont faites, mais échouent, faute d'une vision claire de la colonisation.

Ce n'est qu'en 1840 que la France décide d'une conquête totale du territoire. Malgré cette décision, les projets ferroviaires avancent lentement. Les autorités préfèrent améliorer les routes au lieu de construire des lignes de chemin de fer, l'Algérie étant jugée moins prioritaire que la métropole. Ce n'est que dans les années 1850 que des changements significatifs surviennent. Sous Napoléon III, un fervent admirateur des progrès industriels britanniques, le chemin de fer algérien devient un symbole de modernité.

En 1854, un projet ambitieux est lancé : une grande ligne traversant le nord du pays avec des embranchements vers la côte. Ce réseau, porté par la Société du chemin de fer de l'Algérie, doit servir à la fois l'économie coloniale et tester des techniques nouvelles.

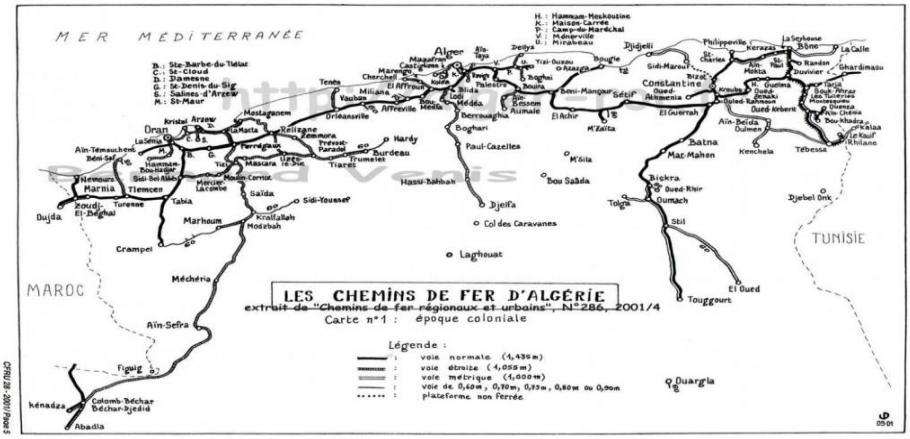


Figure I.1 : Réseau ferroviaire algérien [avant 1962]

Malgré ces ambitions, les réalisations restent lentes en raison des coûts élevés, des rivalités industrielles et du manque d'engagement de l'État français. Résultat, à la fin des années 1850, l'Algérie ne possède toujours pas un véritable réseau ferroviaire. Ce n'est que dans les décennies suivantes que le chemin de fer prend véritablement son essor, devenant un outil essentiel pour la colonisation et l'exploitation économique du territoire.

Aujourd'hui, ce patrimoine ferroviaire colonial, témoin d'une histoire complexe, est largement abandonné. Faute de protection juridique, il risque de disparaître, effaçant peu à peu les traces d'une époque où le rail était censé être un moteur de la "modernisation" de l'Algérie

I.3 Développement du chemin de fer en Algérie

I.3.1 Chronologie du réseau ferroviaire algérien

Le réseau ferroviaire algérien s'est développé sur une longue période, tout au long de la colonisation et continue de s'étendre. La chronologie des lignes ferroviaires a été recherchée à partir de diverses sources, telles que des ouvrages anciens et des archives ferroviaires. Cependant, une priorité a été donnée aux ouvrages écrits, car des contradictions peuvent exister entre les sources.

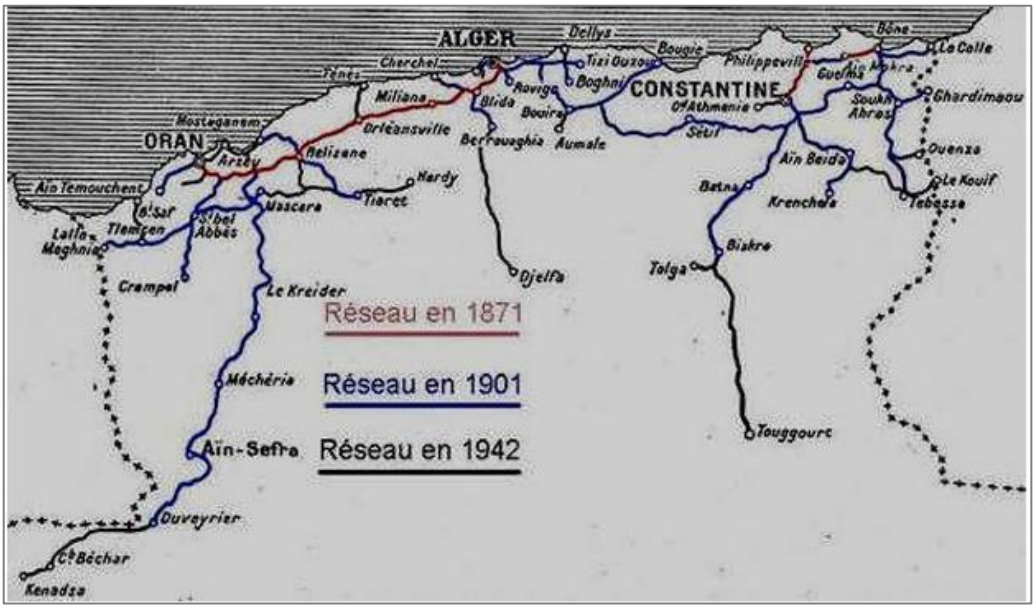


Figure I.2: Chronologie du réseau ferroviaire Algérien [1942]

I.3.2 Développement du réseau ferroviaire algérien

I.3.2.1 Programme de 1879

En 1879, sous la Troisième République, un nouveau plan de développement du chemin de fer en Algérie est lancé pour mieux relier les régions, notamment le sud, et soutenir la colonisation.

Ce programme prévoit la construction de 1 747 km de nouvelles lignes, avec des objectifs à la fois stratégiques, économiques et militaires. Il existait deux types de lignes :

- **Les lignes d'intérêt général**, financées par l'État.
- **Les lignes d'intérêt local**, financées par les communes ou les départements.

I.3.2.2 Programme de 1907

À partir de 1900, alors que l'Algérie accède à une certaine autonomie financière, un vaste plan de développement ferroviaire est lancé sous l'impulsion du gouverneur Jonnart. Ce plan prévoit la modernisation du réseau existant, l'élargissement des voies, ainsi que la construction de 1 256 km de nouvelles lignes, souvent en voie étroite afin de réduire les coûts. Cependant, le déclenchement de la Première Guerre mondiale freine considérablement l'avancement des travaux.

En 1920, un nouveau programme ambitionne d'ajouter 1 300 km de voies. Mais la baisse d'intérêt pour le transport ferroviaire limite fortement sa réalisation. Un projet d'envergure porté par l'État, principalement pour des raisons stratégiques et militaires, est légalisé en 1941. Il débute durant la Seconde Guerre mondiale mais est rapidement interrompu. Seule la ligne Bou-Arfa – Béchar est achevée avant l'abandon définitif du projet.

La gestion du réseau est alors reprise par l'État, à l'exception de la ligne gérée par la compagnie PLM, partagée avec la Compagnie Franco-Algérienne d'Exploitation (CFAE). Malgré ces efforts, le rail reste en retrait par rapport au développement des routes, ce qui mène à un réseau déséquilibré que l'Algérie hérite au moment de l'indépendance en 1962.

I.3.2.3 Évolution du réseau après l'indépendance

Après 1962, le réseau ferroviaire algérien reste principalement centré sur le transport minier. Peu d'avancées sont observées jusqu'aux années 1980, où quelques modernisations et extensions sont entreprises. Ce n'est qu'à partir des années 2000 que l'on observe un regain d'intérêt, avec le lancement de projets structurants tels que la construction de rocades, le développement des lignes de banlieue et le désenclavement du sud du pays. Toutefois, en 2009, le réseau reste moins étendu qu'en 1925, avec plusieurs infrastructures à l'abandon et un recul global du transport ferroviaire, malgré les initiatives de relance.

I.3.2.4 Projet du transsaharien

L'idée d'un chemin de fer transsaharien remonte au XIX^{e} siècle, lorsque la France envisageait une liaison ferroviaire entre l'Algérie et l'Afrique noire. Ce projet connaît un nouvel élan en 1923, mais il est rapidement freiné par des conflits d'intérêts entre les régions. En 1928, seul le tracé ouest reliant Oran, Béchar et le Maroc est envisagé sérieusement, sans toutefois aboutir.

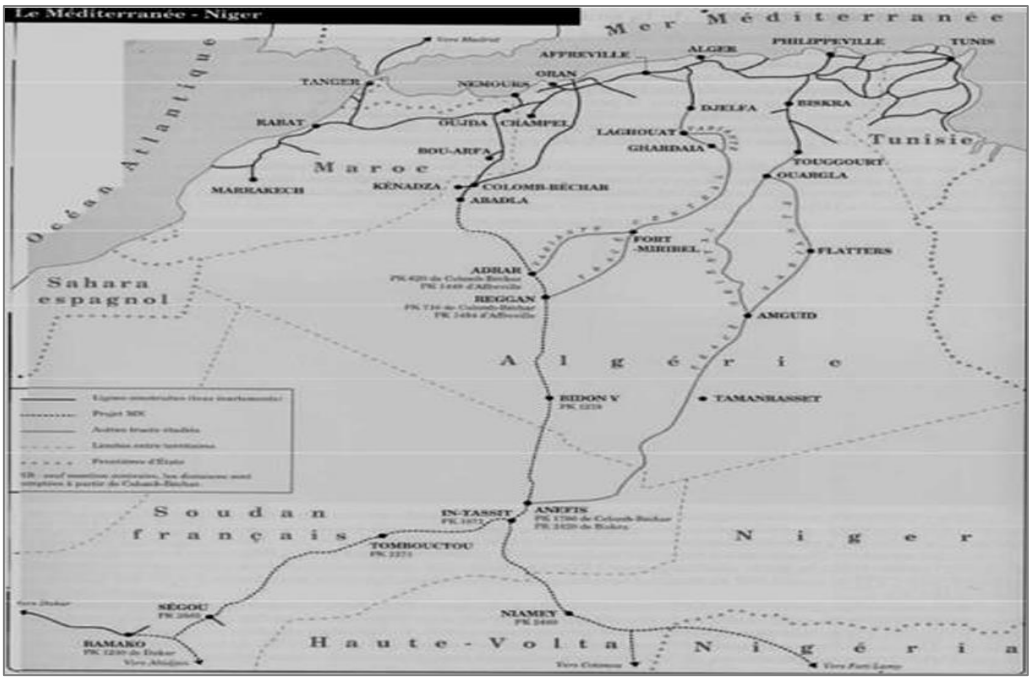


Figure I.3 : Projet du transsaharien [Méditerranée-Niger 1947]

I.4 Présentation des caractéristiques techniques du réseau ferroviaire

Bien que le réseau ferroviaire algérien respecte les normes techniques internationales, il présente certaines particularités liées à l'histoire coloniale et aux caractéristiques géographiques du pays. Ces éléments ont fortement influencé sa conception et son évolution. Le tableau II.I mentionne les principaux aspects qui définissent ce réseau.

Tableau I.1 : Caractéristiques techniques du réseau ferroviaire algérien

Caractéristique	Description	Justification
1. Répartition géographique	Concentré dans le nord (le Tell)	Zone la plus riche (agriculture, forêts, mines) et stratégique pour la colonisation
2. Objectif du réseau	Transport des matières premières vers les ports pour l'exportation	Logique coloniale axée sur l'économie d'exportation plutôt que sur la desserte intérieure
3. Configuration du réseau	Pas d'architecture « en étoile » (contrairement à la France), mais une juxtaposition de lignes Est-Ouest avec des extensions Sud	Adaptée à la géographie et à la logique d'exploitation économique coloniale

4. Groupes de lignes	- Ligne longitudinale (Est-Ouest) - Lignes transversales (vers les ports) - Lignes de pénétration vers le Sahara - Ligne minière (vers Annaba et vers Gara djibilet)	Répond aux besoins logistiques et miniers, et permet la connexion aux réseaux marocain et tunisien
5. Tracé	Complexe : plaine, montagne, vallées	Relief accidenté nécessitant des ponts, tunnels, viaducs, etc.
6. Pentes des voies	- Faible : < 8 ‰ - Moyenne : 8-10 ‰ - Forte : > 10 ‰	Souvent dicté par l'économie des travaux : minimisation des tunnels et ouvrages d'art
7. Rayons de courbure	- Standard Europe : > 500 m (en Algérie : jusqu'à 200 m)	Adapté à la topographie et motivé par des contraintes budgétaires (moindre coût)
8. Nombre de voies	Voie unique majoritairement, réservations pour double voie sur les axes importants	Économie sur les coûts, planification à long terme sur certains axes
9. Influence historique	Tracés parfois inspirés des chemins antiques romains	Exemple : Kabylie longtemps contournée, puis traversée plus tard
10. Vitesse des trains	Réduite par rapport aux normes modernes à cause des courbes et des pentes importantes	La topographie et les choix techniques ont freiné les performances du réseau

I.5 Perspectives de développement du rail en Algérie

Le secteur ferroviaire en Algérie connaît une dynamique de relance ambitieuse, inscrite dans une stratégie nationale de modernisation des infrastructures. L'objectif fixé est d'étendre le réseau ferroviaire à 15 000 km à l'horizon 2030, contre 4 300 km actuellement en service. Cette expansion vise à connecter efficacement les grandes villes, les pôles économiques, les ports et les régions sahariennes.

Parmi les projets structurants figure la ligne Transsaharienne Alger–Tamanrasset (2 406 km), destinée à renforcer l'axe nord-sud. Elle est complétée par la ligne minière Béchar–Tindouf–Gara Djebilet, stratégique pour l'exploitation du fer au sud-ouest. Ces projets soutiennent le développement régional et l'accès aux ressources. Ils s'inscrivent dans une vision de croissance inclusive et durable.

D'autres lignes stratégiques sont en cours de réalisation, notamment :

- La LGV Oued Tlelat–Maghnia, qui devrait fluidifier le trafic interurbain dans l'ouest du pays
- La ligne Touggourt–Hassi Messaoud, qui dessert les bassins pétroliers sahariens.

Les perspectives du rail en Algérie sont encourageantes sur les principes du développement durable, notamment en matière de transition énergétique, de lutte contre les inégalités régionales et de stimulation des échanges économiques. Toutefois, leur concrétisation dépendra :

- De la maîtrise des délais de réalisation, notamment en ce qui concerne l'expropriation des terrains
- D'une gestion rigoureuse des financements,
- Et d'une intégration harmonieuse des projets dans leur contexte socio-environnemental.

I.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de retracer l'ensemble du développement du chemin de fer en Algérie, en mettant en lumière ses aspects techniques, tout en soulignant comment l'État algérien a veillé à poursuivre cette évolution même après l'indépendance.

CHAPITRE II

Présentation du projet

II. Présentation du projet

II.1 Introduction

En Algérie, le développement des infrastructures de transport a été une priorité pour le gouvernement, avec des investissements majeurs dans les réseaux routiers, autoroutiers et ferroviaires. Le chemin de fer joue un rôle essentiel dans ce développement en facilitant les échanges économiques, la mobilité des populations et l'intégration des régions isolées.

Parmi les projets majeurs du pays, la ligne Gara - Djebilet (Tindouf) - Béchar, d'environ 950 km et en voie unique électrifiée, se distingue par son importance. Ce projet, intégré au Schéma Directeur National des Infrastructures Ferroviaires, comprend notamment le tronçon minier Gara Djebilet-Tindouf-Béchar. Il vise à améliorer le réseau ferroviaire, soutenir l'exploitation minière et renforcer la position de l'Algérie dans les secteurs minier et logistique.

II.2 Ligne Minière Ouest : Oran - Gara Djebilet

Le projet de la ligne minière Ouest, reliant Oran à Gara Djebilet sur 1650 km, traverse cinq wilayas et touche plus de 2 millions d'habitants. Il est lié à l'exploitation d'un immense gisement de fer de 3,5 milliards de tonnes. Le projet comprend 5 sections :

1. Section 01 : du Pk 0+000 au Pk 200+000.
2. Section 02 : du Pk 200+000 au Pk 400+000.
3. Section 03 : du Pk 400+000 au Pk 600+000.
4. Section 04 : du Pk 600+000 au Pk 800+000.
5. Section 05 : du Pk 800+000 au Pk 950+000

- Ce projet comprend également 12 gares.

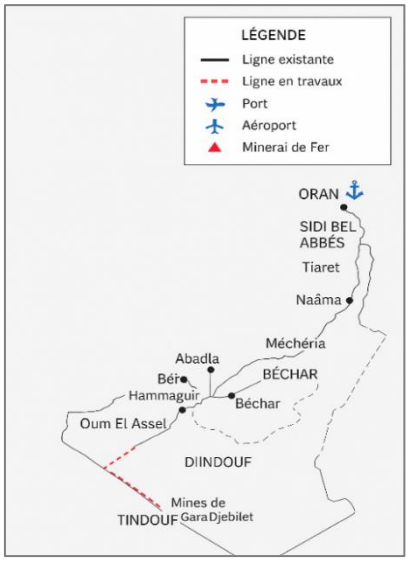


Figure II.1 : Ligne minière ouest

Tableau II.1 : Aspects positifs et obstacles du projet

Points forts du projet	Contraintes technique
- Des réserves considérables, dépassant 1 milliard de tonnes à une teneur en fer de 57%. - Exploitation à ciel ouvert avec faible taux de découverture. - Croissance économique favorable et forte demande d'acier en Algérie et en Afrique. - Fort soutien du Gouvernement Algérien et partenaire de renommé internationale, engagé envers le projet	- Éloignement du Gisement - Haute teneur en phosphore - Ensablement

- Position géographique stratégique réduisant les coûts de fret - Faible coût de l'énergie et de la main-d'œuvre	

II.3 Présentation de la zone d'étude

Le projet de la ligne minière de l'Ouest s'étend sur une distance de 950 km, répartie en cinq sections principales. Il traverse trois wilayas du sud-ouest algérien : Béchar, Beni Abbès et Tindouf. Les communes concernées sont Béchar, Kenadsa, Abadla, Erg Ferradj, Mechraa Houari Boumediène, Tabelbala, Oum El Assel et Tindouf.

Actuellement, les travaux portent sur la section 2 du projet, située entre le PK 200+000 et le PK 400+000, avec une étude en cours sur un tronçon de 15 km entre les PK 255+000 et 270+000.

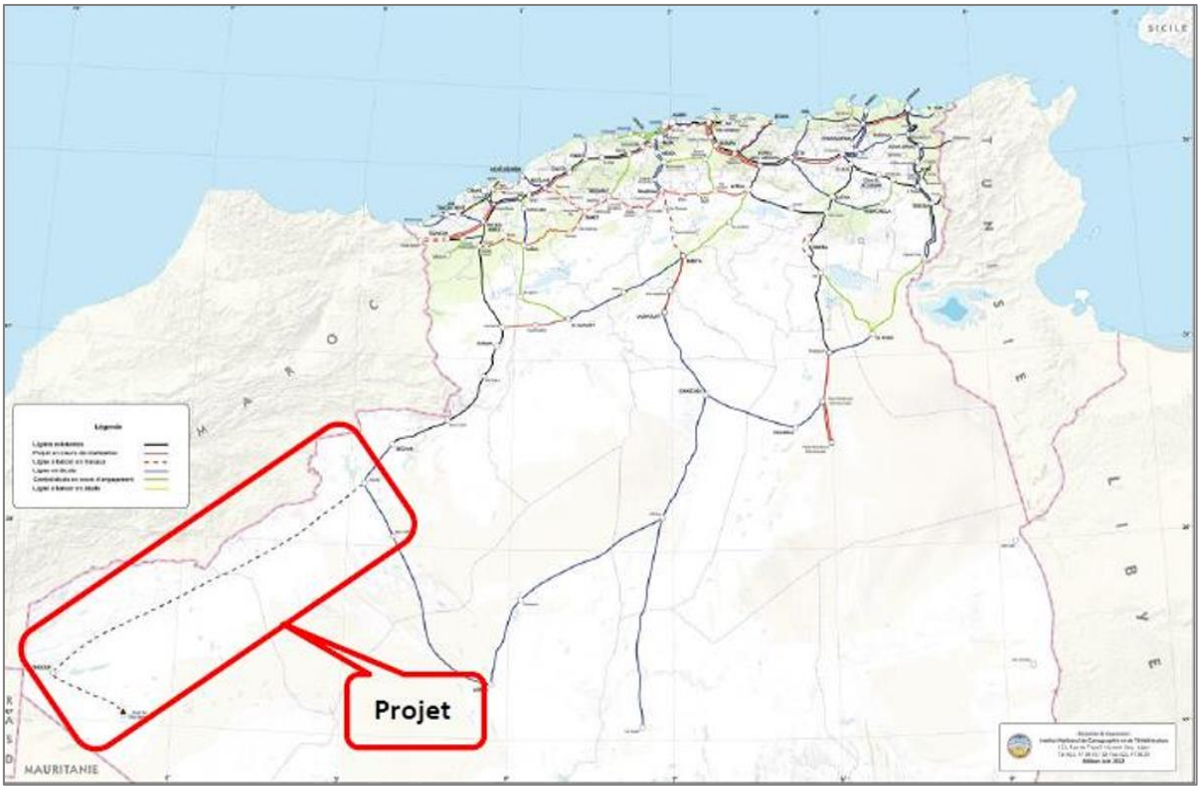


Figure II.2 : Zone du projet

Le projet ferroviaire reliant Béchar, Béni Abbès et Tindouf s'appuie sur la situation géographique stratégique de ces trois wilayas du sud-ouest algérien.

- **Béchar** : Située au cœur du désert saharien dans l'ouest de l'Algérie, c'est une wilaya frontalière du Maroc. Elle est également entourée par Naâma (nord), El Bayadh (est), Adrar et Tindouf (sud). Avec une superficie de 162 200 km² et une population d'environ 273 000 habitants, elle représente un point central du projet grâce à sa localisation et à son potentiel minier élevé.
- **Béni Abbès** : Placée au sud de Béchar, cette wilaya s'étend sur 101 350 km². Elle est bordée au nord par Béchar, à l'est par Timimoun, à l'ouest par le Maroc, et au sud par Tindouf et Adrar. Elle

joue un rôle de liaison territoriale, servant de zone de passage essentielle pour le prolongement du tracé ferroviaire.

- **Tindouf** : située à l'extrême sud-ouest, dans la région de la Saoura, Tindouf se trouve à 720 km de Béchar. Elle partage ses frontières avec la Mauritanie, le Maroc, le Sahara occidental, et la commune de Reggane (Adrar). Grâce à cette position géostratégique, elle constitue un maillon clé pour connecter les zones minières du sud aux infrastructures portuaires du nord, facilitant ainsi les exportations de ressources.



Figure II.3 : Limites administratives de la wilaya de BECHAR et de la wilaya de BENI ABBES

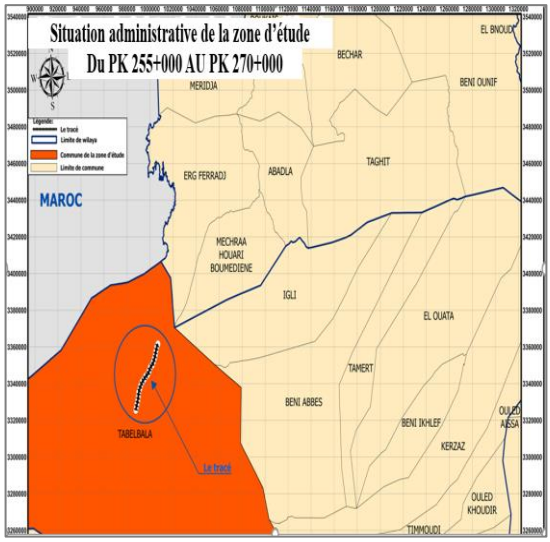


Figure II.4 : Situation administrative de la zone d'étude

II.3.1 Relief

La zone d'étude présente un relief principalement désertique, composé de plateaux, de massifs montagneux, de plaines arides ainsi que d'oueds asséchés. L'altitude moyenne s'élève à environ 800 mètres. Le site spécifique étudié se distingue par un terrain relativement plat, facilitant certaines implantations.

II.3.2 Climat

La région concernée est soumise à un climat désertique chaud, marqué par des températures élevées, des précipitations très faibles, ainsi que d'importants écarts thermiques entre le jour et la nuit. Ces conditions orientant le choix de construction et d'aménagement.

II.3.3 Sismicité

- Selon le Règlement Parasismique Algérien (Version 2024), l'Algérie est divisée en sept zones selon le niveau de risque sismique.
- **Zone 0** : Sismicité très faible
- **Zone I** : Sismicité faible

- **Zone II** : Sismicité faible à moyenne
- **Zone III** : Sismicité moyenne
- **Zone IV** : Sismicité moyenne à élevée
- **Zones V & VI** : Sismicité élevée

D'après le zonage sismique, la wilaya de Béni Abbès se situe en zone 0, caractérisée par une activité sismique négligeable. Le risque sismique y est donc très faible, avec des séismes rares et de faible intensité.

En revanche, la wilaya de Béchar est classée en zone I, ce qui traduit une sismicité plus marquée.

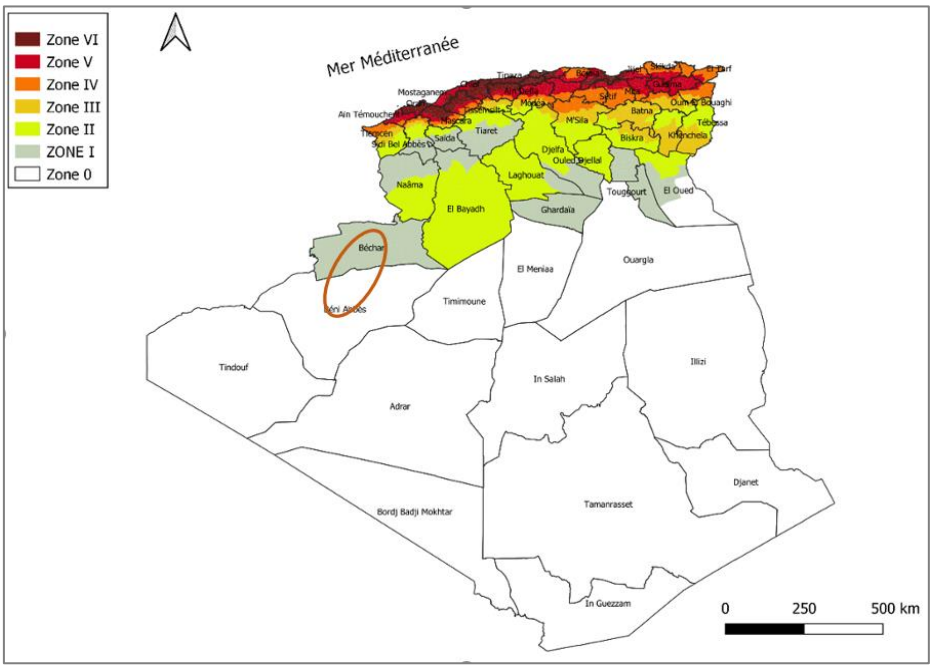


Figure II.5 : Carte de zonage sismique de l'Algérie (RPA 2024)

II.4 Présentation du projet étudié

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons mené une étude d'Avant-Projet Détaillé (APD) portant sur un tronçon de 15 km de la ligne ferroviaire minière située dans l'Ouest algérien, entre les points kilométriques PK 255+000 et PK 270+000. L'objectif principal de cette étude est d'optimiser le transport des minerais tout en veillant à une intégration territoriale cohérente avec les caractéristiques locales.

Le tracé étudié se situe entre la wilaya de Béchar, en zone saharienne, et traverse plusieurs entités administratives :

Au nord, les communes d'Erg Ferradj et Mechraa Houari Boumediène, à l'est, Igli et Béni Abbès, à l'ouest, la frontière algéro-marocaine, et au sud, la commune de Oum El Assel.

Ce segment ferroviaire longe en grande partie la Route Nationale n°50 (RN50), qui relie Hamaguir à Tabelbala. Il s'inscrit pleinement dans la stratégie nationale de développement des infrastructures

ferroviaires, visant à renforcer les capacités logistiques du pays et à soutenir l'exploitation durable des richesses naturelles du sud-ouest algérien.

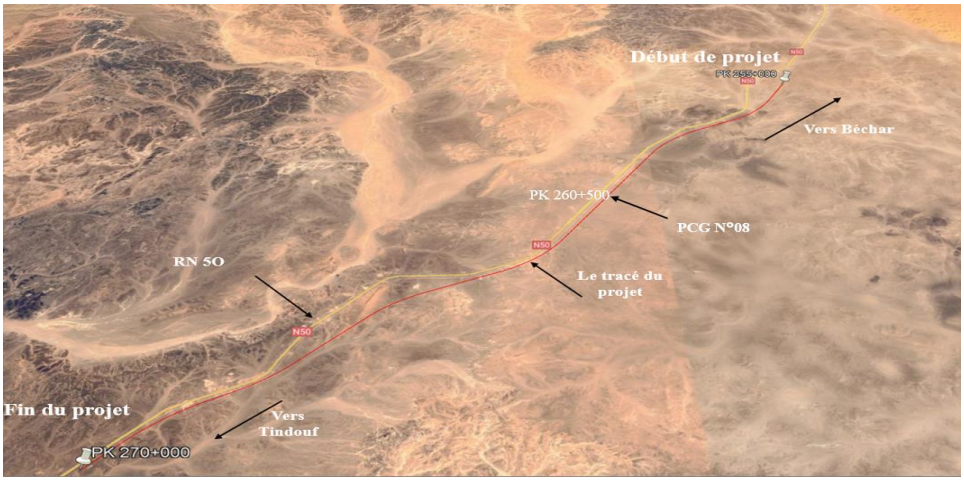


Figure II.6 : Présentation de l'axe du projet sur site par Google Earth

II.5 Caractéristiques du projet

II.5.1 Caractéristiques de base

- Longueur 15 Km.
- Caractéristiques géométriques selon les recommandations de la SNTF et les standards UIC.
- Logiciel utilisé dans l'étude est **: Civil 3D 2024.**
- Trafic mixte voyageurs et marchandises.
- Mode de traction est le diesel.
- La gare de croisement.

II.5.2 Caractéristiques de la voie

- Vitesse de conception du tracé pour le trafic voyageur 160 km/h
- Vitesse de conception du tracé pour le trafic marchandises 70 km/h.
- La voie normale sera construite à écartement normal e = 1435 mm en alignement.
- Charge à l'essieu de conception en pleine voie 32.5 t.
- Charge à l'essieu de conception pour les ouvrages 32.5 t.
- Ouvrage d'art pour double voie.
- Le rail utilisé sera du type 60 E1.
- Les traverses utilisées sont des traverses mono-bloc en béton précontraint.
- L'entraxe est de 4.20 m en voie principale et de 4.20 à 5.00 m dans les faisceaux de voie.
- Type d'attache : Attache nabla

- La largeur de la plate-forme est de 8.00 m.
- Une bande 0.70 m sera prévue pour l'implantation des équipements de signalisation, télécommunications et électrification ; l'axe des poteaux caténaires devra se situer à un minimum de 3.15 m de l'axe de la voie.
- Un cheminement de 0.70 m à partir de l'axe du poteau de la caténaire sera aussi implanté pour la circulation piétonnière du personnel de maintenance de la voie dans le cas des voies à l'air libre uniquement.
- La ligne ne comprend aucun passage à niveau.

II.6 Conclusion

Globalement, le tronçon du PK 255+000 au PK 270+000, situé en zone saharienne, présente des conditions techniques favorables à la pose ferroviaire. Conçu selon les normes UIC et SNTF, il permettra un trafic mixte sur voie normale, avec une infrastructure adaptée aux charges lourdes. Ce projet s'intègre pleinement dans la stratégie nationale de développement minier et logistique

CHAPITRE III

Superstructure ferroviaire

III. Superstructure ferroviaire

III.1 Introduction

La sécurité est un principe fondamental du transport ferroviaire, mais l'exploitation d'un réseau reste une activité complexe qui demande une organisation précise, des compétences spécialisées et des technologies propres au secteur ferroviaire.

La voie ferrée joue un rôle essentiel : elle guide et soutient les trains en assurant leur circulation en toute sécurité et avec confort. Sa structure doit permettre un roulement fluide, avec un minimum d'efforts de traction, ce qui impose des profils aussi plats que possible. Elle doit aussi résister aux efforts statiques (poids des trains) et dynamiques (liés au mouvement).

La voie se compose de trois éléments principaux :

- Les rails, chemin de roulement,
- Les traverses, qui maintiennent l'écartement des rails,
- Le ballast, qui absorbe et répartit les charges sur la plate-forme

III.2 Composants de la superstructure

L'armement de la voie constitue une composante essentielle de l'infrastructure ferroviaire. Il désigne l'ensemble des éléments posés sur la plateforme de voie. La voie permet aux trains de rouler en les guidant et en supportant leur poids. Elle utilise le contact métal sur métal pour avancer facilement. Il existe plusieurs types de voies : celles pour la circulation des trains, pour les manœuvres, le stationnement, ou pour permettre à deux trains de se croiser.

Une voie moderne suit des règles précises : largeur standard (1435 mm), rails bien fixés, traverses solides, et un sol renforcé avec du gravier ou du béton.

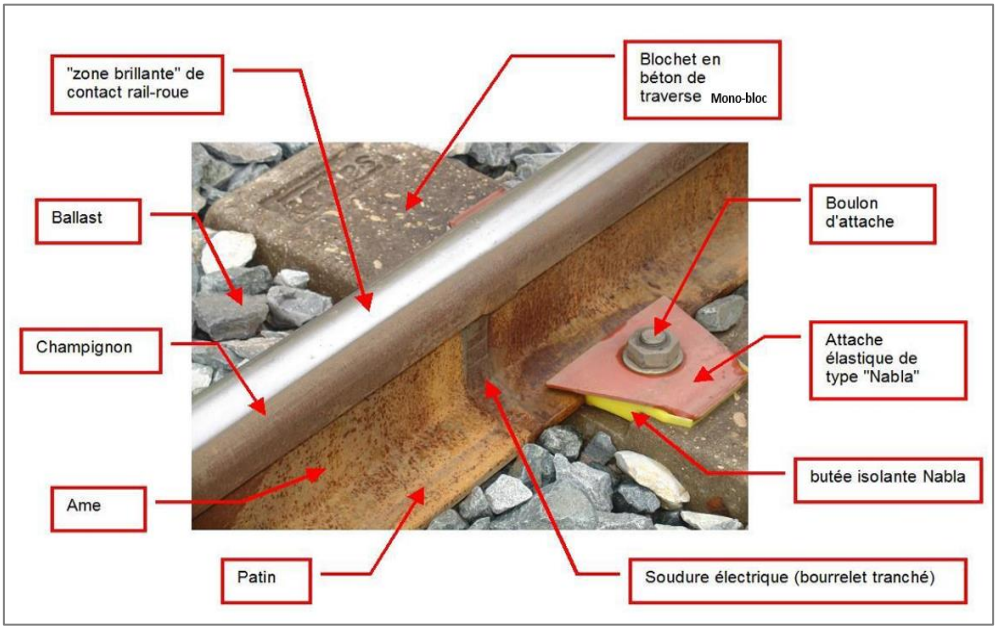


Figure III.1 : Composants de la voie du projet

III.2.1 Rail

Le rail répartit les charges exercées par les roues dans les plans vertical, transversal et longitudinal. Il guide l'essieu, maintient sa stabilité, et assure un contact efficace entre la roue et la surface de roulement. Ce contact acier sur acier, caractérisé par une faible surface d'appui, réduit la résistance au roulement tout en facilitant le transfert des charges vers les traverses via les attaches.

Il existe plusieurs profils de rails en voie :

- Le profil double champignon
- Le profil Vignole
- Le rail à gorge

III.2.1.1 Éléments constitutifs du rail

Chaque rail est composé de trois parties principales qui sont :

III.2.1.1.1 Table de roulement

C'est la surface du dessus du rail, sert de piste sur laquelle les roues du train circulent. Sa forme légèrement bombée permet de réduire les chocs et les vibrations, facilitant ainsi le glissement des roues.

III.2.1.1.2 Champignon

C'est la partie supérieure du rail, et sa forme est déterminée par plusieurs éléments. Sa largeur doit être suffisante pour assurer une bonne connexion entre les rails. Sa hauteur est choisie pour faciliter la fabrication, l'entretien et garantir une bonne résistance à l'usure. Les faces latérales du champignon sont inclinées pour améliorer le contact lors du raccordement des rails, tout en évitant que le boudin des roues ne touche le rail.

III.2.1.1.3 Âme

C'est la partie verticale entre le champignon et le patin, est définie par son épaisseur et la forme des raccords arrondis avec les autres parties du rail. Son épaisseur doit être suffisante pour supporter les efforts concentrés autour des congés et des trous d'éclissage.

III.2.1.1.4 Patin

Il est situé à la base du rail, le patin est défini principalement par sa largeur, son épaisseur et la forme de ses ailes. Ces caractéristiques dépendent à la fois des contraintes d'utilisation et des exigences de fabrication.

- ♣ Dans le projet Bechar / Tindouf (Gara Djebilet), on utilise le rail du type UIC60.Voici un tableau illustratif qui résume les caractéristiques de UIC60 :

Caractéristiques	UIC 60
Masse	60.21 kg/ml
Hauteur du rail	172 mm
Largeur du champignon	72 mm
Largeur du patin	150 mm
Epaisseur de l'âme	16.5 mm
Longueur min des barres	18 m
Nuance	260 (carbone-manganèse)
Surface de la section	76.70 cm²
Dressage	Classe A
Dureté au milieu de la table de roulement	260 HBW
Allongement	Supérieur à 10 %
Résistance à la traction	Supérieur à 880 N/mm²

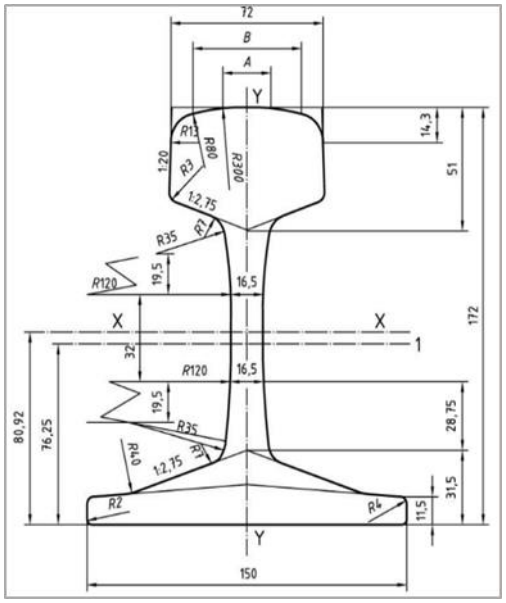


Figure III.2 : Profil rail du type UIC 60 E1

III.2.1.2 Fabrication des rails

La fabrication des rails se fait principalement à partir de blooms, des blocs d'acier semi-finis. Le processus comprend plusieurs étapes clés :

- Les blooms sont d'abord chauffés dans un four à environ 1200°C pour les rendre malléables.
- Une fois chauffés, ils passent dans plusieurs cages de laminage : cages dégrossisseuses pour réduire leur taille, puis dans des cages universelles qui donnent au rail sa forme définitive (champignon, âme, patin).
- Les rails sont ensuite refroidis à l'air ou traités thermiquement selon leur usage, puis ils sont redressés pour assurer leur rectitude.
- Avant leur expédition, les rails passent par plusieurs tests : mesures dimensionnelles et tests par ultrasons et courants de Foucault pour détecter d'éventuels défauts internes ou de surface.
- Les rails sont ensuite sciés à la bonne longueur (souvent 108 mètres), puis ils peuvent être soudés entre eux pour former des barres longues de 432 mètres appelées LRS (Long Rails Soudés).

III.2.2 Traverse

Un élément essentiel de la voie ferrée, fabriqué généralement en bois, en béton ou en métal. Son rôle principal est de répartir les charges des trains sur le ballast, d'assurer le maintien des rails à l'écartement et à l'inclinaison définis, et de stabiliser les rails en empêchant leur déplacement longitudinal.

Ainsi, elle garantit la sécurité et la stabilité de la circulation ferroviaire, en maintenant la géométrie de la voie.

III.2.2.1 Caractéristiques communes aux traverses

Les différents types de traverses partagent plusieurs caractéristiques essentielles :

- **La liaison rail-traverse** : elle est assurée par un système d'attaches spécifique, qui peut être :
- **Rigide**, lorsqu'il n'y a aucun dispositif élastique entre l'attache, le rail et la traverse.
- **Élastique**, lorsqu'un élément amortisseur est présent pour absorber les chocs et les vibrations.
- **La table de la traverse** : elle soutient le patin du rail et permet de garantir son inclinaison standard de 1/20, soit grâce à une table directement inclinée, soit à l'aide d'un dispositif inséré pour assurer cette inclinaison.

III.2.2.2 Types de traverses

- **Traverses métalliques :** sont fabriquées en acier laminé, d'un poids d'environ 40 kg/m. Elles sont de forme concave pour assurer la stabilité et répartissent bien les charges sur la plateforme. Elles durent longtemps, s'ancrent bien dans le ballast et demandent peu d'entretien. En revanche, elles coûtent cher, isolent mal électriquement, sont plus difficiles à régler et génèrent du bruit au passage des trains**.**

  La traverse métallique est constituée de trois éléments principaux : La crosse (ou bêche), la table et la partie centrale.

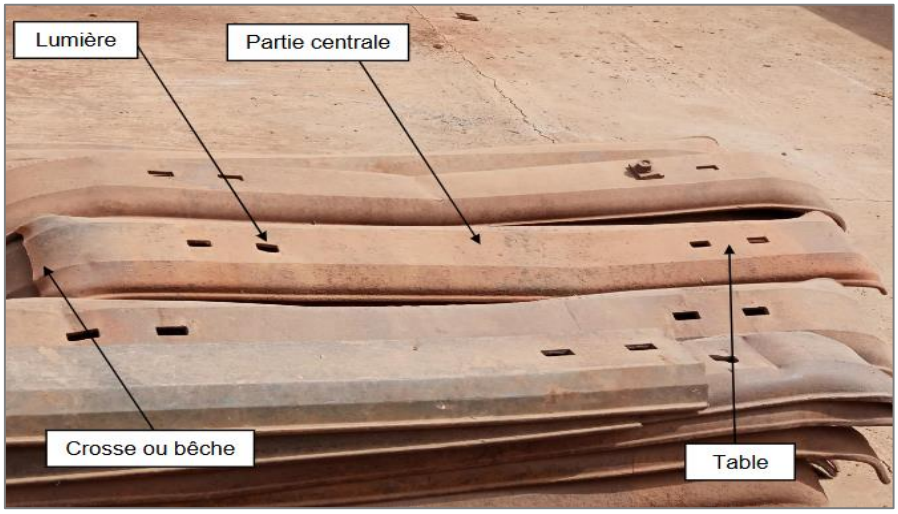


Figure III.3 : Traverse métallique

Les traverses métalliques sont principalement utilisées sur les voies à fort trafic ou en milieu industriel en raison de leur robustesse et longévité, mais leur coût élevé, leur mauvaise isolation électrique et les nuisances sonores limitent leur usage dans les zones urbaines ou électrifiées.

- **Traverses en béton armé :** Il existe deux types qui sont :

1. **Traverse monobloc** : Bloc de béton moulé armé de fils d'acier à haute résistance. Comporte deux têtes avec des tables inclinées à 1/20 et une partie centrale.



Figure III.4 : Traverse en béton MONOBLOC

2. **Traverse bi-blocs** : Composée de deux blochets en béton armé reliés par une entretoise métallique en T ou V. Elle doit supporter des efforts de 30 tonnes sans fissuration. La traverse S.L est la plus courante, remplaçant la R.S, désormais abandonnée.

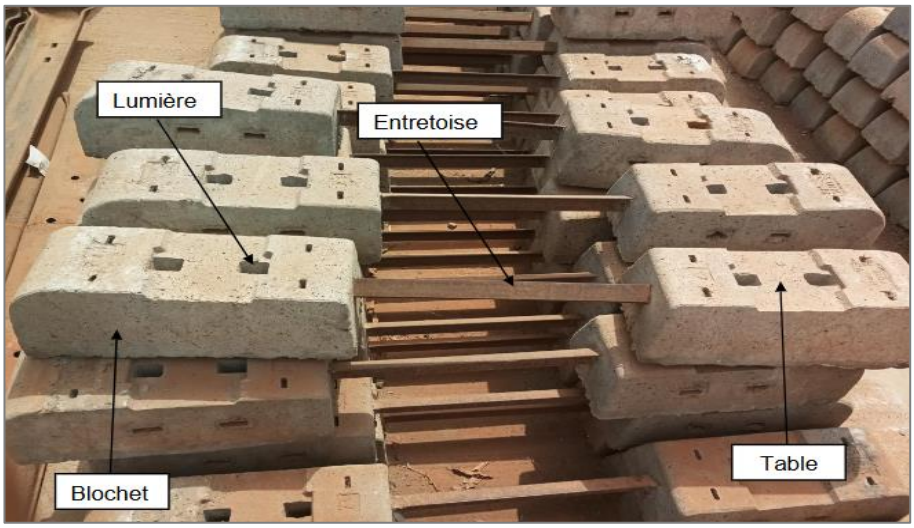


Figure III.5 : Traverse en béton BIBLOC

♣ Dans ce projet, on a utilisé des traverses de type **Monobloc M450**.

- **Traverses en bois** : étaient largement utilisées dans le passé, mais leur utilisation a diminué en raison de leur coût élevé et de leur durée de vie plus courte par rapport à d'autres matériaux. Toutefois, elles restent employées dans des applications spécifiques, telles que les appareils de voie, où elles continuent de répondre à des besoins particuliers



Figure III.6 : Traverse en Bois

III.2.3 Attache



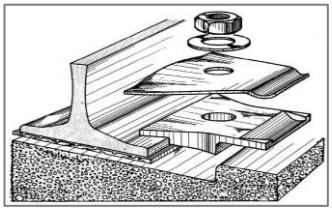


Figure III.7: Système d'attache

Les fixations de rail, également appelées ancrages de rail, sont des éléments essentiels qui permettent de fixer solidement les rails aux traverses ou au plaques d'assise. Elles assurent la stabilité, le bon alignement et la sécurité de la voie ferrée.

Le choix du système de fixation dépend de plusieurs facteurs :

- Le type de support utilisé (par exemple : traverse en bois)
- Les charges et contraintes exercées par le trafic ferroviaire
- Les conditions environnementales (humidité, température, corrosion, etc.)
- Les besoins en matière de maintenance et de longévité du réseau

Parmi les systèmes de fixation élastiques les plus couramment utilisés, on retrouve :

- **Attache Nabla** : est un système de fixation élastique pour rails sur traverses béton, offrant une bonne tenue à la fatigue dynamique. Rapide à poser, mécanisable et nécessitant peu d'entretien, elle est compatible avec traverses monoblocs ou bi-blocs.

♣ Dans ce projet, on a utilisé attache de type **NABLA tirefond spécial 22-115 type 5.**

III.2.4 Appareils de voie

Pour permettre le passage d'un train d'une voie à une autre, des branchements sont implantés. Ces branchements peuvent être à commande électrique ou manuelle, et sont caractérisés par l'angle de déviation au niveau du cœur. Les appareils de voie, conçus sans dévers ni courbe de raccordement pour

la voie déviée, nécessitent un rayon minimal défini selon la vitesse. Ils se composent de rails spéciaux et d'aiguilles mobiles.

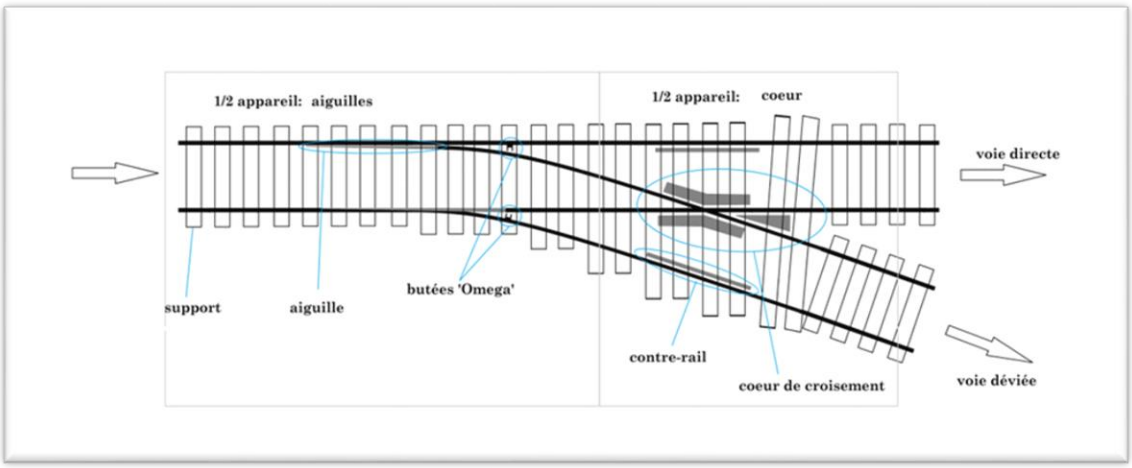


Figure III.8 : Composants de appareil de voie

En général, les appareils de voie sont préfabriqués en atelier, puis assemblés sur site. Ils se composent de trois éléments principaux : l'aiguillage, partie mobile permettant d'orienter le train ; le croisement, situé au centre de l'appareil, où les rails se croisent et intègrent le cœur ; et la partie intermédiaire, qui assure la liaison entre l'aiguillage et le croisement.

Dans le langage courant, les appareils de voie sont désignés sous le terme « aiguillage ». On distingue alors trois grands types :

- **Le branchement simple**
- **Le croisement** (ou traversée simple)
- **La traversée jonction**, simple ou double, qui combine les deux précédents

III.2.5 Long rail soudé

C'est des barres longues, une méthode moderne de pose des voies ferrées qui permet d'éliminer la plupart des joints entre rails sur de très longues distances. Cette technique, utilisée principalement sur les lignes à fort trafic comme les lignes à grande vitesse, tend aujourd'hui à devenir la norme sur l'ensemble du réseau ferroviaire.

La suppression des joints dans les LRS offre deux principaux avantages :

- Une diminution des coûts d'entretien de la voie.
- Une amélioration de la qualité du roulement et un meilleur confort pour les voyageurs.

III.2.5.1 Types de soudure

Le soudage des rails est important pour assurer que les voies ferrées soient sûres, durables et bien connectées. Il existe plusieurs méthodes de soudage, chacune adaptée à des besoins différents. Voici les principales techniques utilisées.

III.2.5.1.1 Soudage électrique

Elle consiste à chauffer les extrémités des rails avec un courant électrique très fort (environ 50 000 ampères) jusqu'à ce qu'elles deviennent assez chaudes pour fondre. Ensuite, on les presse fortement l'une contre l'autre pour les souder. Cette méthode donne une soudure solide et fiable, souvent utilisée en atelier ou sur des chantiers bien équipés.



Figure III.9 : Soudage électrique

III.2.5.1.2 Soudage aluminothermique

C'est une technique largement utilisée pour l'assemblage des rails. Ce procédé repose sur une réaction chimique exothermique entre de la poudre d'aluminium et de l'oxyde de fer, produisant une fusion à très haute température (environ 2500 °C).

La réaction génère de l'acier en fusion, qui permet de souder parfaitement les extrémités des rails. Après refroidissement, la soudure est ébarbée et le profil du rail est reconstitué pour assurer la continuité mécanique et géométrique de la voie.

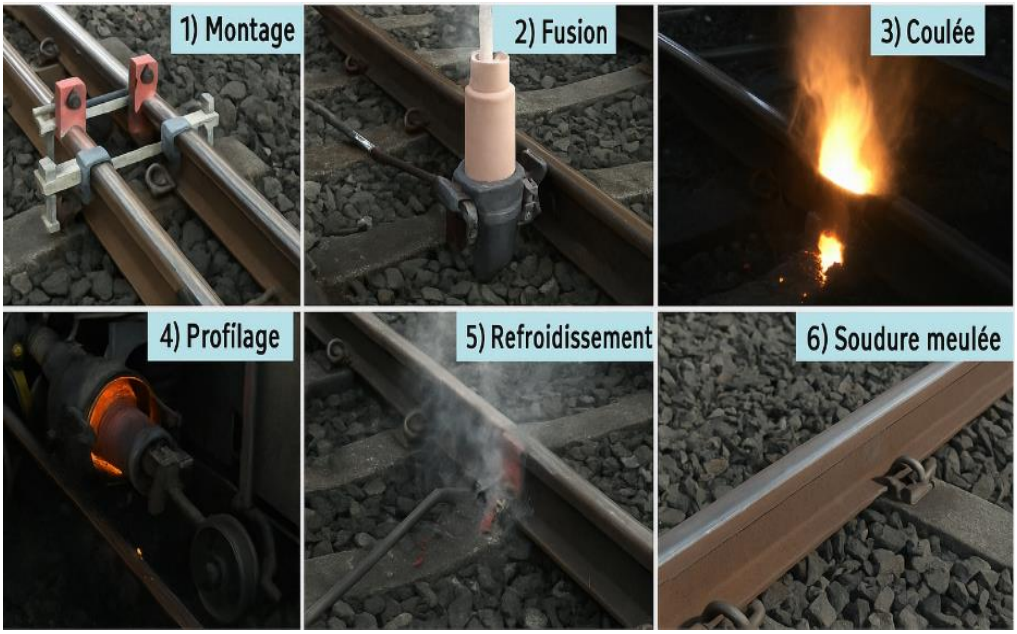


Figure III.10: Soudage aluminothermique

III.2.6 Fonctionnement d'un branchement incorporé en LRS

Un branchement incorporé en LRS est un dispositif qui permet d'intégrer une aiguille ou un appareil de voie dans une section en rails soudés longs, sans interrompre la continuité mécanique des rails. Contrairement aux branchements classiques, ce système limite les zones de dilatation libres, car les rails sont soudés sur de longues distances. Cela nécessite des solutions spécifiques pour absorber les contraintes thermiques et préserver l'intégrité de la géométrie de voie.

Ce type de branchement est conçu pour résister aux forces générées par les variations de température, grâce à des techniques de pose et de calage adaptées. Il améliore la stabilité de la voie et réduit les opérations de maintenance en supprimant les joints mécaniques traditionnels. Toutefois, sa mise en œuvre requiert une étude précise des contraintes thermiques, une préparation minutieuse du support, ainsi que des composants compatibles avec la logique de soudure continue des LRS.

III.3 Conclusion

En analysant les éléments constitutifs de la voie ferrée, il devient évident que chaque composant joue un rôle déterminant dans la stabilité et la sécurité du transport ferroviaire. L'évolution des pratiques, notamment avec l'utilisation des longs rails soudés (LRS) et des traverses en béton, permet non seulement de réduire les coûts d'entretien, mais aussi d'assurer un confort de roulement et une durabilité accrue du réseau, répondant aux défis de projets.

CHAPITRE IV

Géométrie ferroviaire

IV. Géométrie ferroviaire

IV.1 Introduction

Concevoir une voie ferrée demande une analyse précise pour garantir la sécurité, le confort des passagers et l'efficacité du transport. Le tracé doit respecter des règles techniques, comme la gestion des courbes, des pentes et des transitions entre les différentes sections.

Ce travail vise à analyser ces paramètres en effectuant les calculs nécessaires et en suivant les normes de la Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF), afin de créer une infrastructure ferroviaire sûre et performante.

IV.2 Tracé en plan

Le tracé en plan d'une ligne de chemin de fer correspond à la projection horizontale de l'axe de la voie. Il est constitué de tronçons en alignement et de tronçons de courbes circulaires, entre lesquels il faut généralement intercaler des courbes de raccordement. Ces courbes de raccordement ont une courbure progressive pour permettre de réduire les chocs. Le choix du tracé répond à des critères exigeants, parmi lesquels :

- Définir une vitesse d'exploitation.
- Réduire les terrassements en évitant les talus dans les zones à risques comme les nappes phréatiques, les roches fissurées, les terrains plastiques ou instables.
- Exploiter l'ancienne infrastructure existante.
- Connecter le tracé aux lignes (réseaux existants).
- Ne pas trop s'éloigner des réseaux routiers (lignes accessibles).
- Minimiser le plus possible les courbes.
- Respecter les rayons de courbure et les longueurs minimales imposés par la SNTF.
- Éviter les zones à risques géologiques (glissements, failles, sols plastiques).

Deux vitesses caractérisent notre projet, qui sont :

- **Vr** : vitesse des trains rapides (voyageurs), fixée à **160 km/h.**
- **Vl** : vitesse des trains lents (marchandises), fixée à **70 km/h.**

IV.2.1 Critère de limitation des paramètres du tracé

Lors de la conception du tracé d'une voie ferrée, certains paramètres géométriques sont soumis à des limites pour garantir la sécurité de l'exploitation, le confort des voyageurs et la bonne tenue de la voie. Deux types de valeurs limites sont définis :

- **Valeur limite normale** : correspond à la valeur maximale à ne pas dépasser dans des conditions d'exploitation standard, avec des vitesses maximales ou minimales autorisées.
- **Valeur limite exceptionnelle** : elle est utilisée uniquement dans des situations particulières

Quand un paramètre dépasse la valeur normale, on peut utiliser la valeur exceptionnelle, mais

seulement si un seul paramètre est concerné. Si plusieurs paramètres dépassent, il faut suivre des règles précises.

IV.2.2 Différents éléments du tracé en plan

L'avant-projet d'une ligne ferroviaire commence par un tracé de principe réalisé à partir de cartes topographiques. L'idéal serait de relier les points à desservir par des alignements droits avec une déclivité constante. Mais à cause du relief, ce tracé idéal n'est souvent pas réalisable. Le tracé réel devient alors une polygonale, avec des alignements reliés par des arcs de cercle.

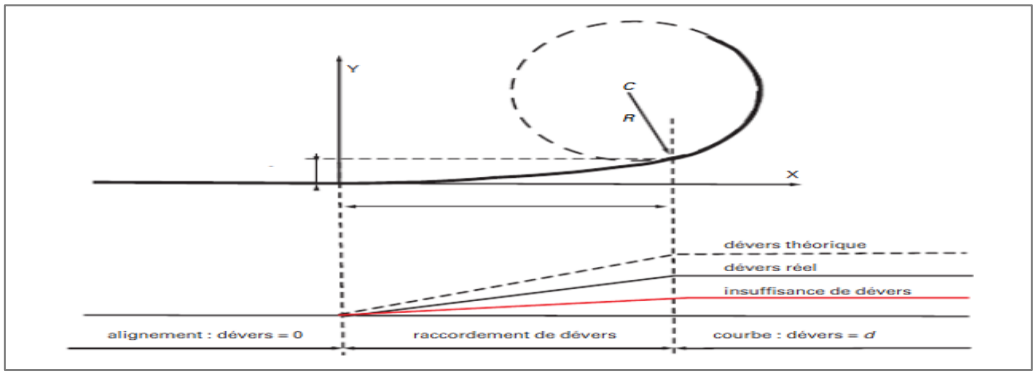


Figure IV.1 : Eléments géométriques du tracé en plan

♣ Le tableau IV.1 résume les principaux éléments du tracé en plan :

Tableau IV.1 : Tableau synthétique des composantes du tracé horizontal

Élément	Définition	Caractéristiques	Objectifs
Alignement	Partie droite du tracé **R = ∞**	Simple, direct, utilisé en terrain favorable	Offre confort et sécurité aux usagers
Arc de cercle	Courbe utilisée quand le terrain ne permet pas d'avoir un alignement droit **R = variable**	Rayon aussi grand que possible, lié à la vitesse	Adapter le tracé au terrain, maintenir la vitesse
Courbe de raccordement	Transition entre l'alignement et l'arc de cercle **R = constant**	Rayon variable (ex : clothoïde), variation progressive de la courbure	Introduire le dévers, assurer confort et stabilité

Les paramètres géométriques du tracé sont définis selon les recommandations de la SNTF, en tenant compte des vitesses prévues :

160 km/h pour **les trains de voyageurs** et **70 km/h** pour **les trains de marchandises**. Ces choix assurent la stabilité de la voie, ainsi que la sécurité et le confort des usagers.

♣ Pour le présent projet, on va utiliser les valeurs normales des paramètres géométriques du tracé en plan. Les paramètres géométriques sont présentés dans le tableau IV.2 :

Tableau IV.2: Paramètres géométriques du tracé en plan selon SNTF

		E_{max} (mm)	I_{max} (mm)	$d_{p\ max}$ (mm)	$(dd/dl)max$ (mm/ml)	$(dd/dt)max$ (mm/s)	$(dI/dt)max$ (mm/ml)	R_{min}	L_{min}
Formule	**Normal**	-	-	-	$\frac{180}{Vmax}$	-	-	$\frac{11.8 \times Vmax^2}{D\ max + I\ max}$	$\frac{Vmax}{2}$
	Exceptionnel	-	-	-	$\frac{216}{Vmax}$	-	-	$\frac{11.8 \times Vmax^2}{D\ max + I\ max}$	$\frac{Vmax}{3}$

- Explication des termes utilisés :

- **E max** : L'excès de devers admissible.
- **I max** : L'insuffisance de dévers admissibles.
- **dp max** : Le dévers pratique maximal.
- **L min** : La longueur minimale des éléments de tracé (alignement droit, pleines courbes).
- **R min** : Le rayon minimum.
- **(dd/dl max** : La limite de la variation de dévers par rapport à la longueur.
- **(dd /dt)max** : La limite de la variation de dévers par rapport au temps.
- **(dI/dt)max**: La limite de la variation d'insuffisance de divers par rapport au temps.

Tableau IV.3 : Application numérique des paramètres géométriques du tracé en plan

		Emax (mm)	**I max (mm)**	**dp max (mm)**	**$(dd/dl)max$ (mm/ml)**	**$(dd/dt)max$ (mm/s)**	**$(dI/dt)max$ (mm/ml)**	**R min**	**L min**
Application	**Normal**	**110**	**150**	**160**	**1.125**	**50**	**75**	**975**	**80**
	Exceptionnel	**130**	**160**	**180**	**1.350**	**60**	**90**	**889**	**54**

IV.2.3 Application au projet :

Il est important de prendre en considération que cette ligne, destinée principalement au transport de minerai de fer, verra passer des trains de marchandises lourds. Cela pourrait entraîner un excès de dévers, surtout à faible vitesse, ce qui augmenterait l'usure sur le rail intérieur.

Compte tenu de la nature mixte de la voie, des ajustements du dévers seront donc effectués afin de limiter cet effet et de garantir la durabilité de la voie.

Le projet porte sur un tracé ferroviaire de 15 km, reliant les communes de Hammaguir et Tabelbala, entre les PK 255+000 et 270+000, en direction sud. Le parcours est principalement rectiligne, avec l'ajout de 7 courbes pour s'adapter au relief tout en maintenant une circulation fluide.

Ce tracé suit en parallèle la RN50 et traverse un point de croisement et garage au PK 260+500

D'après la SNTF, pour une vitesse de 160 km/h, le rayon minimal de courbure est de 975 m. À titre d'illustration, un rayon de 2300 m sera utilisé pour démontrer les différentes étapes de calcul afin de déterminer le dévers et les paramètres associés.

♣ **Calcul pour un rayon R=2300**

- **Dévers théorique** :
  - Pour les trains lents : dth min = $\frac{11.8 \times Vmax^2}{R} = \frac{11.8 \times 70^2}{2300}$ = 25 mm
  - Pour les trains rapides : dth max = $\frac{11.8 \times Vmax^2}{R} = \frac{11.8 \times 160^2}{2300}$ = 131 mm
- Parmi les valeurs obtenues, on retient le dévers théorique minimal, ce qui correspond à la valeur pratique adoptée.

  Donc, le dévers adopté est : **$d_{adopté}$=25mm.**
- **Coefficient de dévers** :

  C=0.006×Vmax² = $0.006 * 160^2$ = 153.6

  On prend C=165 (La valeur de C doit être un multiple de 15)

  $0.5 < \frac{C}{0.0118 \times Vmax^2} < 0.7 \rightarrow 0.5 < \frac{165}{0.0118 \times 160^2} = 0.55 < 0.7$ → condition vérifiée
- **Dévers pratique :**

  dp = $\frac{1000 \times C}{R} = \frac{1000 \times 165}{2300}$ = 72mm< $dmax = 160\ mm$, condition vérifiée .
- **Excès de devers :**

  E=dp-d_{thmin} =25-25=0 ≤ E_{max} =110mm, condition vérifiée.
- **Insuffisance de dévers :**

  I= d_{thmax}-dp =131-25=106 mm ≤ I_{max} =150 mm, condition vérifiée.
- **La longueur de raccordement progressif 'clothoïde' :**

  Lrp = $\frac{dp \times Vmax}{180}$ = 22.22 mOn prend : Lrp =75 m

♣ **Remarque :** La longueur de raccordement progressif initialement calculée est de 22 mètres. Toutefois, cette valeur ne respecte pas les limites réglementaires relatives à la variation du dévers en fonction du temps.

Pour y remédier, un calcul itératif a été effectué afin d'augmenter progressivement cette longueur.

♣ Le tableau IV.4 présente les différentes valeurs obtenues au cours de ce processus.

Tableau IV.4 : Vérification de la longueur de raccordement progressif (Lrp)

Rayon (m)	LRP (m)	Vitesse (m)	I (mm)	d adopté	dI/dt (mm/s)	dI/dt (mm/s)	Vérification
2300	22	160	106	25	214.14	50.50	Condition non respectée
	30				157.03	37.03	Condition non respectée
	40				117.78	27,78	Condition non respectée
	50				94.22	22.22	Condition non respectée
	60				78.52	18.51	Condition non respectée
	70				67.30	15.87	Condition respectée
	75				**62.81**	**14.81**	Condition respectée

♣ Donc la valeur adoptée dans notre tracé est Lrp =75 m, car elle garantit le respect des exigences dynamiques en matière de confort et de sécurité.

- **Le paramètre du clothoïde :**

$A^2 = Lrp \times R \quad \rightarrow A=\sqrt{Lrp \times R} = 415.33$

- **Variation de dévers :**
  - **Par rapport aux longueurs :**

$\frac{\Delta d}{\Delta L} = \frac{dp}{Lrp} = 0.33$ mm/m ≤ 1.125, condition vérifiée.

  - **Par rapport au temps :**

$\frac{dd}{\Delta t} = \frac{dp \times Vmax}{3.6 \times Lrp} = 14.81$ mm/s. ≤ 50, condition vérifiée

- **Variation de l'insuffisance de dévers par rapport au temps :**

$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I \times Vmax}{3.6 \times Lrp} = 62.81$ mm/s. ≤ 75, condition vérifiée

Tableau IV.5 : Récapitulatif des paramètres du tracé

Rayon (m)	Vitesse		dth max (mm)	dth min (mm)	dp (mm)	d adopté	I (mm)	E (mm)	Lrp (m)	Lrp adopté	dd/dL (mm/m)	dI/dt (mm/s)	dd /dt (mm /s)
	V_v	V_m											
1900	**160**	**70**	**159**	**30**	**87**	**30**	**129**	**0**	**27**	**100**	**0.30**	**57.33**	**13.33**
2000			**151**	**29**	**82**	**29**	**122**	**1**	**26**	**80**	**0.36**	**67.78**	**16.11**
2300			**131**	**25**	**72**	**25**	**106**	**0**	**22**	**75**	**0.33**	**62.81**	**14.81**
2600			**116**	**22**	**64**	**22**	**94**	**0**	**20**	**70**	**0.31**	**59.68**	**13.97**

NB : Le tracé est réalisé à l'aide de logiciel CIVIL 3D 2024 et les éléments du tracé en plan sont réalisé dans l'annexe (Voir annexe A)

Remarque :

Dans le cadre du tracé ferroviaire, les courbes de raccordement progressif deviennent obligatoires lorsque la variation de courbure dépasse une certaine limite fixée par la norme. Cette condition est donnée par: $\Delta C > \frac{7000}{Vmax^2}$ (pour $100 < V \leq 160$km/h)

Et dans le présent cas, la vitesse maximale est de 160 km/h, ce qui donne : $\Delta C > \frac{7000}{160^2} = 0{,}273$

Par ailleurs, la variation de courbure entre l'alignement et la courbe est calculée selon la relation : $\Delta C = 1000 / R$,donc $\Delta C = 1000 / 2300 = 0.434 > 0{,}273$ (C'est vérifier pour tous les rayons→RP obligatoire)

♣ **Interprétation des résultats**

Dans le cadre de ce projet, la priorité donnée à la circulation de trains lourds (charge d'essieu de 32,5 tonnes) a conduit à la réduction de l'excès de dévers, afin de garantir un meilleur contact roue-rail et limiter l'usure. Ce dévers réduit a servi de base pour le dimensionnement de l'ensemble du tracé.

Les valeurs retenues conviennent aussi bien aux trains lents qu'aux trains rapides. Les vérifications ont confirmé l'absence d'excès de dévers, une insuffisance maîtrisée, et la nécessité d'ajuster la longueur de la clothoïde pour respecter les exigences réglementaires. Tous les paramètres (paramètre A, variation du dévers et de l'insuffisance) ont été validés.

IV.3 Profil en long

Le profil en long est la représentation verticale d'un projet de voie ferrée (ou routière), obtenue par la projection horizontale de la cote de la file basse des rails sur un plan vertical passant par l'axe du tracé.

Il permet de visualiser les variations d'altitude de la voie tout au long de son parcours, en fonction du relief naturel du terrain. Dans la terminologie ferroviaire, le profil en long indique :

- Le repérage en Points Kilométriques (PK) et hectométriques.
- L'altitude en mètres.
- La déclivité (i) : le palier est l'horizontale ; la rampe, la montée ; la pente, la descente (elles s'expriment en millimètres par mètre ou pour mille).

Le profil en long est constitué de paliers, rampes et pentes, reliés entre eux par des raccordements circulaires qui assurent une transition douce entre les différentes inclinaisons.

Pour garantir un tracé fiable, bien adapté au terrain et durable, le profil en long doit respecter un ensemble de règles techniques et géométriques précises, parmi lesquelles :

- Respecter les paramètres géométriques et les rayons minimaux indiqués par les normes.
- Éviter les angles rentrants en déblai, car ils empêchent l'écoulement des eaux.
- Préférer un léger remblai à un léger déblai pour une meilleure évacuation des eaux.
- Chercher un équilibre entre déblais et remblais pour limiter les coûts et l'impact sur l'environnement.
- Éviter les hauteurs de remblais trop importantes, qui peuvent poser des problèmes de stabilité.
- Éviter les lignes cassées avec trop de petites pentes successives : mieux vaut utiliser un seul grand cercle ou une courbe à rayon progressif.
- Regrouper deux cercles proches de même sens en un seul.
- Adapter le tracé au relief naturel et au paysage traversé.

IV.3.1 Composantes du profil en long

IV.3.1.1 Longueur minimale des déclivités

La déclivité est l'inclinaison d'un terrain par rapport à l'horizontale. Techniquement, c'est la tangente de l'angle entre le profil en long et l'horizontale. On parle de rampe quand ça monte, et de pente quand ça descend.

Elle a un impact direct sur plusieurs aspects :

- Elle influence l'écoulement des eaux (important pour éviter les stagnations ou l'érosion),
- Elle joue un rôle important dans la sécurité du freinage, surtout en descente,
- Et elle affecte le confort et la facilité de démarrage, notamment en montée.

En ferroviaire, c'est un paramètre très important à prendre en compte lors de la conception d'une ligne, car il agit directement sur les efforts de freinage et de traction. Pour éviter les risques et garantir un bon

fonctionnement, la SNTF (géométrie de la voie chapitre 6) fixe des valeurs limites de déclivité, et cela en fonction de la longueur des sections :

- Si la longueur est inférieure à 3000 m, la déclivité doit rester inférieure ou égale à 16‰, avec une tolérance exceptionnelle jusqu'à 18‰.
- Entre 3000 m et 15 000 m, la déclivité doit diminuer progressivement de 16‰ à 13‰, exceptionnellement de 18‰ à 15‰.
- Pour les longueurs supérieures à 15 000 m, la limite est fixée à 13‰, exceptionnellement 15‰.

Cependant, ces valeurs limites dépendent de plusieurs facteurs techniques et opérationnels, à savoir :

- L'adhérence entre les roues et les rails ;
- Le mode de traction et les caractéristiques des véhicules (performance des engins moteurs, résistance des attelages) ;
- Les caractéristiques de la ligne et la topographie du terrain (y compris le choix de l'écartement) ;
- Les programmes d'exploitation envisagés (trafic probable, longueur et charge des convois) ;
- De la longueur des déclivités.

Tableau IV.6 : Longueurs minimales des déclivités

Les paramètres	**Normal**	**Exceptionnel**
Longueurs minimales des déclivités	V /2	V/2.5
V : vitesse des voyageurs (km/h)		

La longueur de raccordement de déclivités doit, en principe, être d'au moins 30 m pour tenir compte des bases de nivellement des bourreuses.

IV.3.1.2 Rayon admissible en raccordements de profil en long

Le confort des passagers dans un véhicule dépend en partie de la façon dont les pentes sont raccordées sur le tracé, un mauvais raccordement vertical peut provoquer des secousses dues à une accélération verticale (*Av*) excessive, surtout à grande vitesse.

Cette accélération est liée à la vitesse *V* et au rayon de raccordement vertical *Rv* par la formule suivante:

$$\mathbf{Av}=\frac{\mathbf{v^2}}{\mathbf{3.6^2}\times \boldsymbol{Rv}} \rightarrow \mathbf{Rv}=\frac{\mathbf{v^2}}{\mathbf{3.6^2}\times \boldsymbol{Av}}$$

Pour des vitesses inférieures à 220 km/h, *Av* doit rester en dessous de 0,22 m/s² pour garantir le confort (et peut aller jusqu'à 0,31 m/s² dans des cas exceptionnels). Ainsi, le tracé doit être étudié de manière à limiter ces accélérations et à assurer une transition douce entre les pentes.

Tableau IV.7 : Valeurs de rayon vertical minimal

Les paramètres	Normal	Exceptionnel
Longueurs minimales des déclivités	0.35 V^2	0.25 V^2
V : vitesse des voyageurs (km/h)		

IV.3.2 Coordination entre le profil en long et le tracé en plan

Pour une bonne coordination entre le profil en long et le tracé en plan, il est important de respecter les points suivants :

- **Changement de pente** : Placer les points de changement de déclivité sur des sections droites ou courbes continues.
- **Courbes** : Éviter de placer une courbe en profil en long juste après une courbe en plan.
- **Angles rentrants** : Garantir un bon confort et une vitesse élevée dans les angles rentrants.
- **Appareils de voie** : Ne pas les placer sur des courbes ou des pentes.
- **Gare** : Prévoir un tronçon plat de 800 à 1200 m pour installer la gare.

IV.4 Application au projet

Voici une application des exigences géométriques du profil en long selon les recommandations de la SNTF, et les seuils du projet.

Tableau IV.8 : Paramètres géométriques de profil en long (SNTF)

		Formule		Application	
		Normal	Exceptionnel	Normal	Exceptionnel
Dmax	L < 3000 m	-	-	16‰	18 ‰
	3000 m < L < 15000 m	-	-	6 ‰ à 13 ‰	18 ‰ à 15 ‰
	L > 15000m	-	-	13 ‰	15 ‰
	Gares et en gare de croissement	-	-	0	0
R min		0.35V^2	0.25V^2	8960	6400
L min		V/2	V/2.5	80	64

Tableau IV.9 : Limites appliquées au profil en long

Pente maximale	Rampe maximale	Pente et rampe dans la gare
8 ‰	6 ‰	0 ‰

♣ **Quelques caractéristiques du profil en long du projet** :

- Le terrain naturel dans cette zone est globalement plat, ce qui a facilité l'établissement du profil en long.
- Le profil en long proposé respecte toutes les contraintes réglementaires : aucune pente ne dépasse la limite de 8 ‰, les rampes sont inférieures à 6 ‰.
- La pente est nulle entre les PK 259+293 et PK 261+822, en raison de la présence de la gare de croisement.

- Conformément à la norme RFN-NG-IF-02 C 32 n°5 (IC 00272), page 26, des raccordements circulaires (RC) doivent être prévus aux points de changement de pente lorsque la différence de déclivité dépasse 2 ‰. Dans notre cas, aucun raccordement n'a été utilisé au PK 266+646, car la différence algébrique de déclivité y est inférieure à ce seuil.

IV.4.1 Conclusion

Cette partie théorique nous a permis de mieux comprendre les paramètres géométriques d'une ligne ferroviaire, ce qui constitue une base importante pour le tracé du présent projet. Grâce à l'étude géométrique, nous avons pu optimiser le tracé en plan et le profil en long en suivant les normes de la SNTF. Les calculs des pentes et des courbes de transition ont été faits pour assurer un trajet fluide et sécurisé, tout en respectant les aspects techniques et environnementaux du projet.

CHAPITRE V

Étude hydrologique et hydraulique

V. Étude hydrologique et hydraulique

V.1 Introduction

La gestion de l'eau est un aspect important dans tout projet d'aménagement. Il est essentiel de savoir comment l'eau circule, s'accumule ou s'évacue pour pouvoir mettre en place des infrastructures solides et efficaces. C'est justement le but d'une étude hydraulique : analyser les écoulements d'eau dans des systèmes comme les rivières, les canaux, les lacs ou les réseaux de drainage.

Cette étude permet surtout d'anticiper les volumes d'eau en cas de fortes pluies, afin de réduire les risques d'inondation et de garantir le bon fonctionnement des ouvrages hydrauliques. Pour cela, plusieurs étapes techniques sont nécessaires, que nous allons voir dans ce chapitre.

L'étude hydraulique s'inscrit donc dans une démarche de prévention, en prenant en compte les caractéristiques du terrain, les besoins techniques, et les changements liés au climat.

V.2 Réseau hydrographique

L'étude des cours d'eau d'un pays ou d'une région constitue ce qu'on appelle le régime hydrographique. Elle s'intéresse à la répartition des eaux de pluie qui ne s'infiltrent pas dans le sol. Ces eaux peuvent former soit des eaux courantes (comme les oueds et les ruisseaux), soit des eaux stagnantes (comme les lacs, chotts ou sebkhas).

Dans le Sahara, les oueds, même s'ils coulent rarement, sont très utiles. Ils permettent d'évacuer l'eau de pluie, d'alimenter les nappes souterraines et d'arroser les oasis. À Béchar et Béni Abbès, les oueds Guir, Zousfana et Saoura remplissent ces rôles. À Béni Abbès, l'Oued Douara aide aussi localement, mais peut gêner certains travaux.

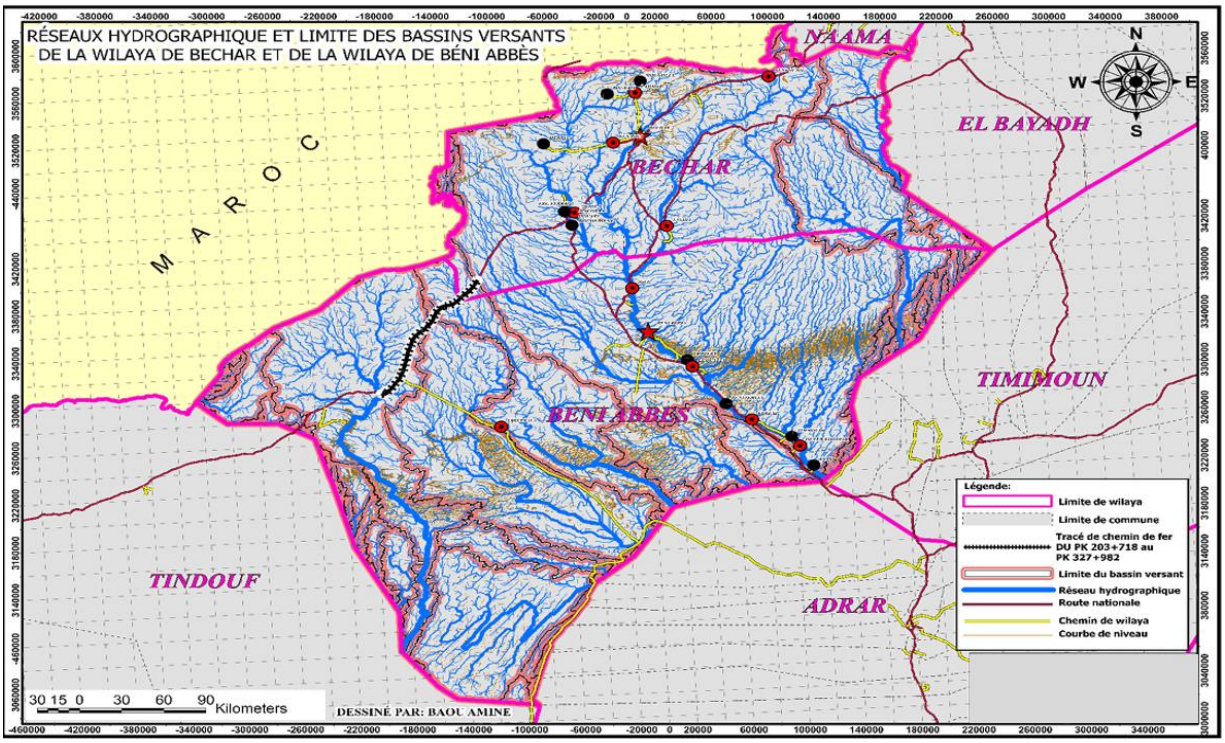


Figure V.1 : Réseaux hydrographique da la zone d'étude

V.3 Étude hydrologique

L'hydrologie est la science qui étudie l'eau, son cycle et ses mouvements dans l'environnement. Elle s'intéresse aux phénomènes comme l'évaporation, les précipitations, l'infiltration et l'écoulement de l'eau dans les sols et les nappes souterraines. Cette discipline est liée à la climatologie et la géologie, et permet de gérer durablement les ressources en eau.

Les études hydrologiques reposent sur l'observation des données de terrain, comme les précipitations, les débits des rivières et les niveaux des nappes. Des outils tels que les modèles numériques et les systèmes d'information géographique permettent d'analyser et de prévoir le comportement de l'eau. L'hydrologie est essentielle pour anticiper les risques de crues, concevoir des ouvrages hydrauliques, protéger l'environnement et planifier les aménagements du territoire.

V.3.1 Caractéristiques climatiques et pluviométriques

V.3.1.1 Climat

La wilaya de Béchar se trouve dans le sud-ouest de l'Algérie, en plein cœur du désert saharien. Elle bénéficie d'un climat désertique continental, marqué par des étés très chauds, dépassant souvent les 45°C, et des hivers froids. Les précipitations y sont faibles, variant entre 15 et 200 mm par an.

V.3.1.2 Température

La région de Béchar et Béni Abbès, située dans le sud-ouest de l'Algérie, a un climat désertique avec des températures très élevées en été, atteignant parfois plus de 45°C, tandis que la température moyenne en journée est autour de 30 à 35°C. En hiver, les températures la nuit peuvent descendre entre 5 et 10°C, surtout en altitude. En moyenne, la température annuelle varie entre 20 et 30°C, avec de grandes différences de température entre l'été et l'hiver, typiques des zones sahariennes.

Tableau V.1 : Température Moyenne durant la période 1991 – 2021

Localité	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy. annuelle
Béni Abbès	10.61	13.19	17.48	22.26	27.05	31.97	35.72	34.87	30.38	23.87	16.53	11.78	23.52
Béchar	10.00	12.30	16.40	20.60	25.20	30.20	34.20	33.20	28.20	22.10	15.20	11.00	22.15

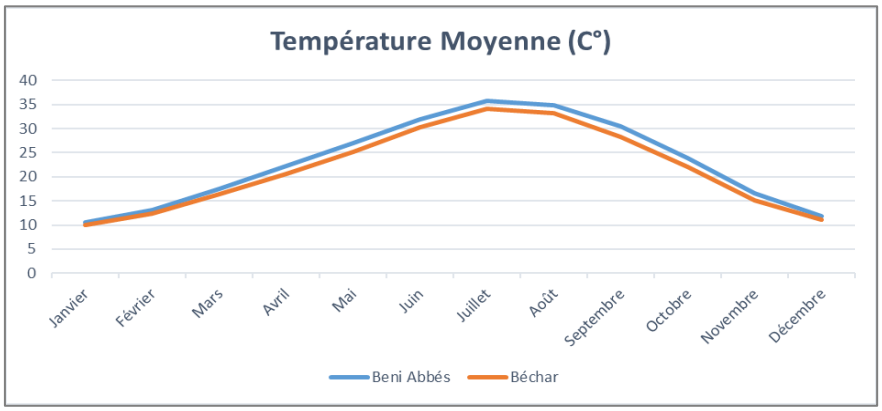


Figure V.2 : Température Moyenne durant la période 1991 – 2021

V.3.1.3 Précipitations

Les précipitations enregistrées dans la région sont généralement liées à l'influence des dépressions sahariennes. Toutefois, pour qu'elles génèrent effectivement des pluies, il est nécessaire qu'elles soient accompagnées de masses d'air humides en provenance de l'Atlantique ou de la Méditerranée.

De manière générale, la répartition des pluies suit un gradient décroissant du nord vers le sud du pays. Cette tendance est également influencée par le relief, notamment dans les bassins versants, où les hauteurs de précipitations varient entre 20 et 30 mm.

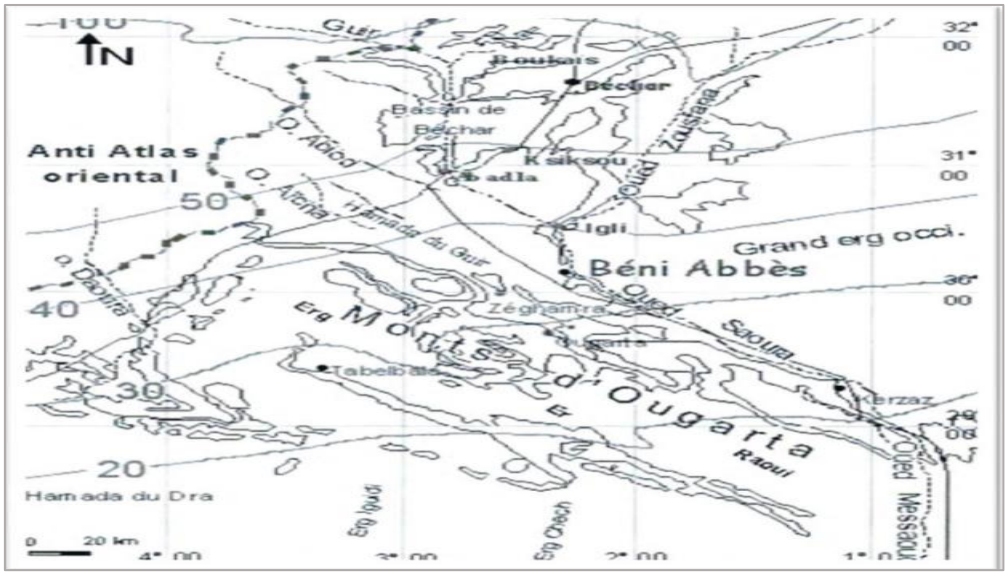


Figure V.3 : Carte pluviométrique du Sud-Ouest algérien (ANRH 1995)

- **Précipitations annuelles**

La région de Béchar, quant à elle, se caractérise par une faible pluviométrie, se situant dans une fourchette comprise entre 30 et 40 mm par an, selon les données de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).

Tableau V.2 : Répartition annuelle des précipitations de la wilaya de Béchar

1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
110	90	40	5	40	50	40	20	15	50
2005	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**
40	10	20	70	100	50	40	60	30	20

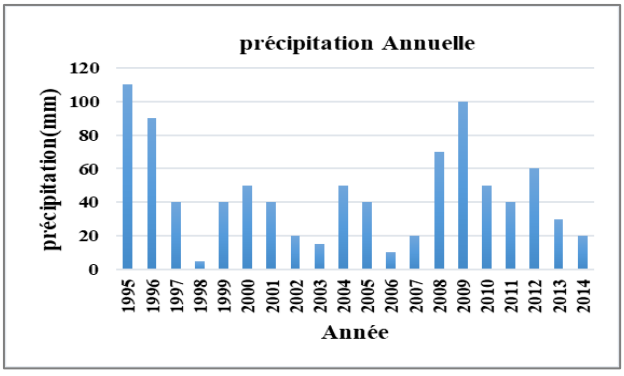


Figure V.4 : Précipitations annuelles dans la wilaya de Béchar de 1995 à 2014

- **Les précipitations journalières**

Dans le cadre de cette étude, nous avons exploité les données de précipitations fournies par la station météorologique de Béchar. Ces données nous ont permis d'analyser les événements pluviométriques caractéristiques de la région. Les relevés utilisés proviennent principalement des stations situées à proximité de la zone étudiée.

Les principales informations relatives aux caractéristiques de la zone d'étude ont été obtenues auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et de l'Office National de la Météorologie (ONM).

Tableau V.3 : Précipitations maximales journalières (Source ONM)

Années	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**
Pj max (mm)	12.8	56	44.3	11.8	26.6	16.8	9.9	42.4	21.9	2.8	14.6
Années	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Pj max (mm)	8.2	21.9	11.7	23	21.9	84.6	38.3	9.2	18.3	58.8	7.8
Années	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022		
Pj max (mm)	69.7	19	23.7	11.3	12.9	14	6.4	5.8	12.6		

♣ Dans le tableau V.4, nous présentons les caractéristiques climatiques de la station de Béchar, relatives aux précipitations journalières maximales observées.

Tableau V.4 : Caractéristiques climatiques de la station de Béchar

Minimum (observé , mm)	2.8
Maximum (observé , mm)	84.6
Moyenne	23.8
Ecart-type	20.1
Médiane	16.8
Coefficient de variation (Cv)	0.84

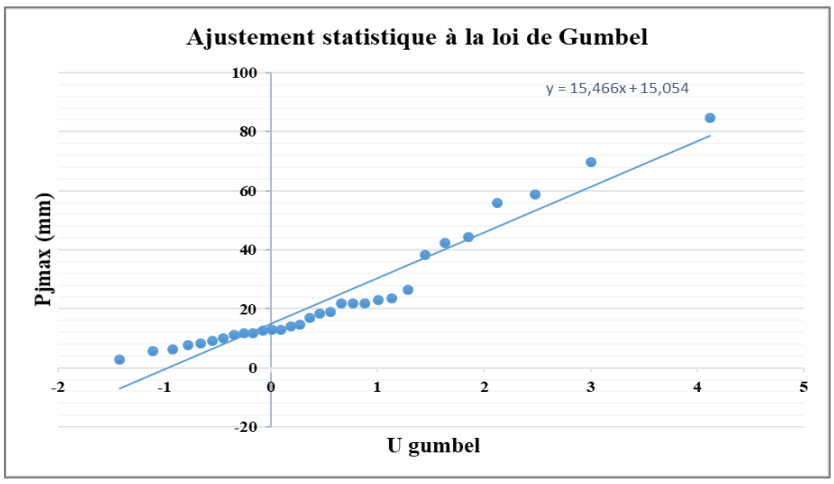


Figure V.5 : Ajustement à la loi de Gumbel des pluies journalières maximales

Tableau V.5 : Pluies journalières maximales fréquentielles

Période T	F(x)	1- F(x)	U gumbel	Pjmax (mm)
10	0.1	0.9	2.25	49.9
20	0.05	0.95	2.97	61.1
50	0.02	0.98	3.90	75.5
100	0.01	0.99	4.60	86.3

- **Pluies de courte durée et courbes IDF**

Les courbes IDF (Intensité – Durée – Fréquence) servent à représenter la relation entre l'intensité d'une pluie, sa durée et sa fréquence d'apparition. Leur objectif est d'estimer l'intensité maximale d'une averse pour une durée donnée et une période de retour fixée. Elles sont indispensables pour le dimensionnement des ouvrages d'assainissement et la gestion des risques d'inondation. Pour les pluies de courte durée, on se base sur les enregistrements pluviographiques et on retient, pour chaque durée (15 min, 30 min, 1h, etc.), la valeur maximale par averse. Ensuite, on utilise cette formule:

$$I(t, T) = a * Tc^{-b}$$

Où :

- I : l'intensité de pluie (mm/h)
- T : temps de concentration (h)
- a et b : paramètres de Montana

Tableau V.6 : Paramètres de Montana sur différentes période de retour

Temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
b	0.80	0.80	0.80	0.79	0.79	0.84
a	11.29	20.96	27.35	33.49	41.43	50.17

Tableau V.7 :Valeurs des intensités en mm/h

Durée (h)	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
24	0.9	1.7	2.2	2.7	3.3	3.5
48	0.5	1.0	1.3	1.5	1.9	1.9
72	0.4	0.7	0.9	1.1	1.4	1.4
96	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.1
120	0.2	0.5	0.6	0.7	0.9	0.9

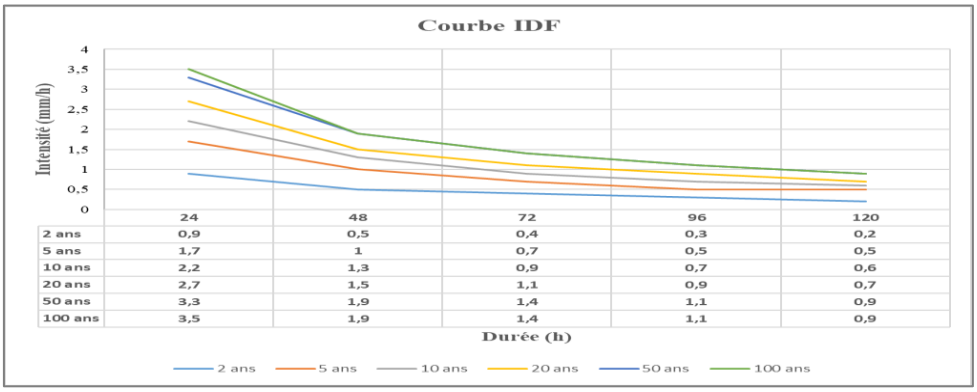


Figure V.6 : Courbe IDF

V.3.2 Caractéristiques morphologiques des bassins versants

Quand la pluie tombe sur un territoire, elle ne se disperse pas au hasard. Elle suit les pentes, se rassemble, et cherche naturellement un point de sortie. Ce trajet organisé, c'est ce qu'on appelle un bassin versant.

Mais tous les bassins versants ne se ressemblent pas. Pour les comprendre et prévoir comment ils réagissent à la pluie, on prend des mesures précises pour établir leur profil hydrologique, et ainsi évaluer la quantité d'eau qu'ils peuvent produire en cas de pluie intense.

Les éléments qu'on étudie sont les suivants :

- S (km2) : Surface
- P (km) : Périmètre
- L (km) : Longueur du cours d'eau principal
- Kc: Indice de compacité
- TC (h) : Temps de concentration en heures
- H_{min}, H_{moy} et H_{max}: altitude minimale, moyenne et la maximale
- P(%): pente du thalweg principal en %
- C : coefficient de ruissellement

Avec ces paramètres, on peut estimer combien d'eau va sortir du bassin quand il pleut fort, c'est la quantité d'eau qui déborde à l'exutoire pendant une grosse pluie.

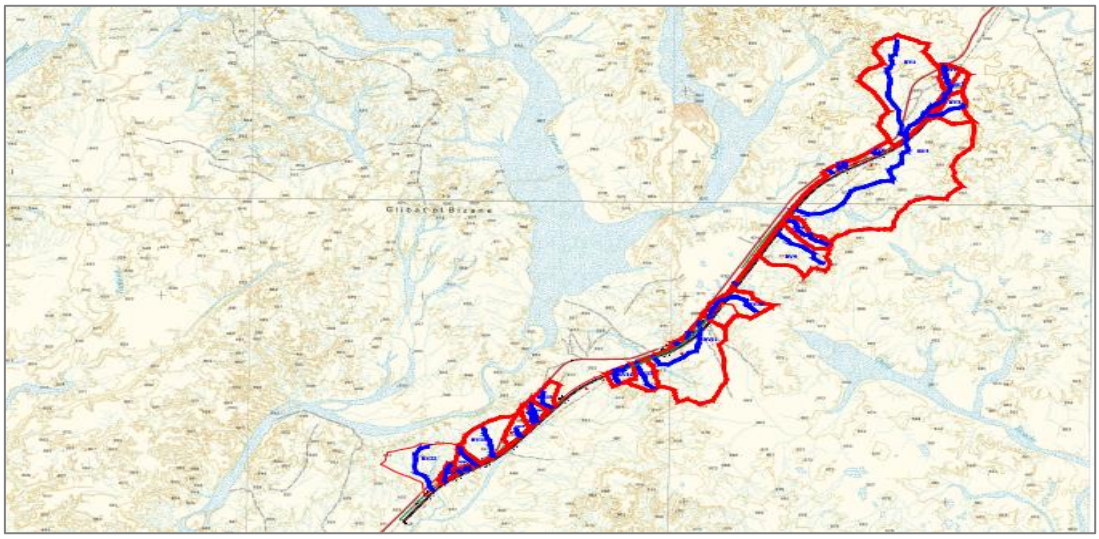


Figure V.7 : Délimitation des bassins versants sur les cartes d'état-major (Civil 3D)

♣ Voici les principales caractéristiques des bassins versants du projet, présentées dans le tableau V.8 :

Tableau V.8 : Caractéristiques des bassins versants du tronçon étudié

N° BV	PK	S(Km2)	P(Km)	Kc	L(km)	Hmax (m)	Hmin (m)	Hmoy (m)	Dh (m)	I(m/m)
BV 1	255+089	0.161	1.775	1.24	0.503	713	696	704.5	17	0.034
BV 2	255+444	0.347	3.117	1.48	1.31	713	695	704	18	0.014
BV 3	255+757	0.363	2.897	1.35	1.3	708	691	699.5	17	0.013
BV 4	256+396	3.274	8.592	1.33	2.59	721	686	703.5	35	0.014
BV 5	257+095	0.117	1.923	1.57	0.13	690	688	689	2	0.015
BV 6	257+890	0.029	0.57	0.94	0.13	680	677	678.5	3	0.023
BV 7	259+218	8.687	15.594	1.48	5.63	721	665	693	56	0.010
BV 8	259+448	0.293	2.684	1.39	1.34	689	665	677	24	0.018
BV 9	259+769	0.903	4.331	1.28	1.32	689	665	677	24	0.018
BV 10	261+785	0.357	2.713	1.27	0.79	672	670	671	2	0.003
BV 11	262+620	2.65	8.717	1.50	1.74	669	656	662.5	13	0.007
BV 12	262+925	0.03	0.89	1.44	0.18	668.5	667	667.75	1.5	0.008
BV 13	264+117	0.28	2.275	1.20	1.12	675	656	665.5	19	0.017
BV 14	264+320	0.185	1.767	1.15	0.616	675	656	665.5	19	0.031
BV 15	266+125	0.211	2.019	1.23	0.497	657	648	652.5	9	0.018
BV 16	266+564	0.106	1.464	1.26	0.48	670	657	663.5	13	0.027
BV 17	267+046	0.202	2.1	1.31	0.23	650	644	647	6	0.026
BV 18	267+777	0.68	3.543	1.20	0.76	651	641	646	10	0.013
BV 19	268+364	0.14	1.831	1.37	0.56	651	643	647	8	0.014
BV 20	268+880	0.082	1.371	1.34	0.446	647	640	643.5	7	0.016
BV 21	269+187	1.01	4.513	1.26	1.36	650	638	644	12	0.009

V.3.3 Calcul des débits de crue relatifs au projet

Les crues sont des écoulements d'eau irréguliers pendant lesquels le débit augmente fortement. Leur étude permet de déterminer le débit maximal probable. Cela est essentiel pour garantir la sécurité des ouvrages à construire sur ou près du cours d'eau.

Les principaux paramètres qui décrivent une crue sont :

- Le débit maximal (débit de pointe)
- Le volume total d'eau écoulée pendant la crue
- Le temps de base (durée totale de la crue).

Quand aucune donnée de mesure du débit n'est disponible pour le cours d'eau, on utilise alors des formules empiriques. Ces formules permettent d'estimer le débit maximal de crue à partir des caractéristiques du bassin versant.

Parmi les méthodes les plus utilisées dans le contexte algérien et recommandées par le guide de l'assainissement routier du SETRA, on distingue :

- **La formule rationnelle** : pour les bassins versants de superficie inférieure à 10 km²
- **La formule de transition** : pour les bassins versants de superficie entre 10 km² et 50 km²

- **La formule de Crupédix** : pour les surfaces entre 50 et 100 km²
- **La formule de Mallet-Gauthier** : pour les surfaces supérieures à 100 km²

♣ Dans le cadre du présent projet, tous les bassins versants identifiés ont une superficie inférieure à 10 km². Par conséquent, la formule rationnelle a été retenue pour l'estimation des débits de crue.

V.3.3.1 Formule rationnelle

La formule rationnelle est exprimée comme suit : $Q_A = \frac{C.I.A}{3.6}$

- Q_A: le débit de crue de fréquence (m³/s)
- C : coefficient de ruissellement
- I : intensité de pluie de fréquence déterminée pour une durée égale au temps de concentration (mm/h)
- A : la surface du bassin versant (km²)

V.3.3.2 Coefficient de ruissellement

Le ruissellement superficiel est la partie de l'eau de pluie qui ne s'infiltre pas dans le sol et s'écoule à la surface vers les cours d'eau. Il correspond à l'eau restante après évaporation, évapotranspiration, stockage temporaire et infiltration.

Pour estimer ce ruissellement, on utilise la méthode de Kenessey : C=C1+C2+C3

- C1 : dépend de la pente
- C2 : dépend de la nature du sol
- C3 : dépend de la couverture végétale.

Tableau V.9 : Valeurs de C1, C2 et C 3

Coefficient	Critère	Catégorie	Valeur		
C1	Pente	≤ 3,5 %	0.01	0.03	**0.05**
		Entre 3,5 et 11 %	0.06	0.08	0.10
		Entre 11 et 35 %	0.12	0.16	0.20
		> 35 %	0.22	0.26	0.30
C2	Nature du sol	Imperméable	0.22	0.26	0.30
		Peu perméable	0.10	0.15	**0.20**
		Perméable	0.06	0.08	0.10
		Très perméable	0.03	0.04	0.0SS5
C3	Couverture végétale	Rocheux	0.22	0.26	0.30
		Prairie	0.17	0.21	**0.25**
		Labours / Champs	0.07	0.11	0.15
		Forêt et territoire sableux	0.03	0.04	0.05

♣ Pour notre cas, on a : une période de retour T=10 ans → C10 = 0.30

une période de retour T=100 ans → C100 = 0.50

V.3.3.3 Temps de concentration Tc

Le temps de concentration (Tc) correspond au délai nécessaire pour qu'une goutte d'eau, tombée au point le plus éloigné d'un bassin versant, parvienne à son exutoire. En Algérie, son estimation se fait à l'aide de formules empiriques reconnues, choisies en fonction de la taille et des spécificités du bassin**.**

- **Formule de VENTURA (S < 5 km²)**

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

- Tc : Temps de concentration en (heures)
- A : Superficie du bassin-versant en (Km²)
- I : Pente moyenne du thalweg principal en (m/m).

- **Formule de PASSINI : (5 km² < S <25km²)**

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

- Tc : Temps de concentration en (heures)
- A : Superficie du bassin-versant en (Km²)
- L : Longueur du thalweg en (Km)
- I : Pente moyenne du thalweg principal en (m/m).

- **Formule de GIANDOTTI : (S > 25 km²)**

$$Tc = \frac{4 \times \sqrt{A} + 1.5 \times L}{0.8 \times \sqrt{Hmoy - Hmin}}$$

- Tc : Temps de concentration en (heures)
- A : Superficie du bassin-versant en (Km²)
- L : Longueur du thalweg en (Km)
- Hmoy : Hauteur moyenne du bassin versant en (m)
- Hmin : Hauteur minimale du bassin versant en (m).

♣ Dans le tableau V.10,on va calculer les débits maximums centennaux des cours d'eau :

Tableau V.10 : Calcul des débits de crue pour le présent projet

N° BV	PK	Surface [km2]	Longueur [km]	Pente [m/m]	Tc (VENTURA)	Ptc 100	I100 [mm/h]	C1	C2	C3	C adopté	Q100 [m3/s]
BV 1	255+089	0.161	0.503	0.0338	0.277	38.64	139.42	0.05	0.20	0.25	0.50	3.12
BV 2	255+444	0.347	1.31	0.0137	0.638	44.90	70.36	0.05	0.20	0.25	0.50	3.39
BV 3	255+757	0.363	1.3	0.0131	0.669	45.29	67.68	0.05	0.20	0.25	0.50	3.41
BV 4	256+396	3.274	2.59	0.0135	1.977	55.04	27.84	0.05	0.20	0.25	0.50	12.66
BV 5	257+095	0.117	0.13	0.0154	0.350	40.31	115.09	0.05	0.20	0.25	0.50	1.87
BV 6	257+890	0.029	0.13	0.0231	0.142	34.28	240.77	0.05	0.20	0.25	0.50	0.97
BV 7	259+218	8.687	5.63	0.0099	3.753	61.77	16.46	0.05	0.20	0.25	0.50	19.86

BV 8	259+448	0.293	1.34	0.0179	0.514	43.18	84.07	0.05	0.20	0.25	0.50	3.42
BV 9	259+769	0.903	1.32	0.0182	0.895	47.72	53.32	0.05	0.20	0.25	0.50	6.69
BV 10	261+785	0.357	0.79	0.0025	1.508	52.42	34.76	0.05	0.20	0.25	0.50	1.72
BV 11	262+620	2.65	1.74	0.0075	2.392	56.96	23.81	0.05	0.20	0.25	0.50	8.76
BV 12	262+925	0.03	0.18	0.0083	0.241	37.68	156.38	0.05	0.20	0.25	0.50	0.65
BV 13	264+117	0.28	1.12	0.0170	0.516	43.22	83.76	0.05	0.20	0.25	0.50	3.26
BV 14	264+320	0.185	0.61	0.0311	0.310	39.42	127.36	0.05	0.20	0.25	0.50	3.27
BV 15	266+125	0.211	0.497	0.0181	0.434	41.88	96.62	0.05	0.20	0.25	0.50	2.83
BV 16	266+564	0.106	0.48	0.0271	0.251	37.97	151.11	0.05	0.20	0.25	0.50	2.22
BV 17	267+046	0.202	0.23	0.0261	0.353	40.37	114.24	0.05	0.20	0.25	0.50	3.21
BV 18	267+777	0.68	0.76	0.0132	0.913	47.89	52.46	0.05	0.20	0.25	0.50	4.95
BV 19	268+364	0.14	0.56	0.0143	0.398	41.24	103.72	0.05	0.20	0.25	0.50	2.02
BV 20	268+880	0.082	0.446	0.0157	0.290	38.97	134.24	0.05	0.20	0.25	0.50	1.53
BV 21	269+187	1.01	1.36	0.0088	1.359	51.45	37.86	0.05	0.20	0.25	0.50	5.31

- **Remarque :** La formule de Ventura et la méthode rationnelle ont été utilisées, car tous les bassins versants ont une superficie inférieure à 10 km². Les débits obtenus varient en fonction des caractéristiques physiques de chaque bassin et des conditions pluviométriques.

V.4 Étude hydraulique

L'étude hydraulique porte sur le comportement de l'eau dans les ouvrages construits par l'homme, tels que les canalisations, les réseaux d'assainissement ou les barrages. Elle permet de calculer les écoulements et de dimensionner les ouvrages pour assurer un transport ou un stockage efficace de l'eau.

Une fois les débits estimés, le dimensionnement des ouvrages est réalisé en respectant les normes d'écoulement. Ce travail est souvent complexe en raison de la diversité des éléments du réseau et des conditions hydrauliques variables. Chaque projet présente des contraintes spécifiques liées au terrain, aux raccordements, aux caractéristiques des effluents, et demande une adaptation aux réalités locales.

V.4.1 Dimensionnement des ouvrages transversaux

La méthode de détermination des sections des ouvrages de transfert est applicable à l'ensemble des systèmes. En première approche, le dimensionnement des sections d'écoulement à surface libre consiste à déterminer la section d'ouvrage nécessaire pour véhiculer un débit donné compte tenu des pentes de l'ouvrage et des pertes de charges linéiques et singulières. Cette première étape de dimensionnement hydraulique est complétée dans un second temps par la vérification :

- Des conditions d'érosion et d'auto curage
- Les canalisations ne se remplissent pas complètement, surtout lors de fortes pluies
- L'augmentation du volume d'eau à véhiculer du fait d'un écoulement aéré

On distingue principalement trois types d'ouvrages :

- Buses (section circulaire)
- Dalots (section rectangulaire ou carrée)
- Ponts / viaducs.

- **Formule de Manning-Strickler**

Plusieurs formules ont été développées pour calculer les écoulements d'eau dans les canaux ou conduites, selon l'évolution des connaissances. On retrouve par exemple les formules de Chezy, Bazin, Manning-Strickler, etc. Chaque formule s'adapte à un type d'écoulement particulier.

La formule de Manning-Strickler est très utilisée car elle permet de faire des calculs rapides, sans répétitions ni approximations successives.

Elle s'écrit : $\mathbf{Qs = Ks \times Sm \times R^{2/3} \times I^{1/2}}$ et $R_h = S_m/P_m$

Où:

- Q : Débit de saturation de l'ouvrage (m^3/s)
- K : Coefficient de rugosité (Pour le béton : Ks = 70)
- R_h : Rayon hydraulique
- Sm : Section mouillée (m^2)
- Pm : Périmètre mouillée (m)
- I : pente longitudinale de l'ouvrage (m/m)

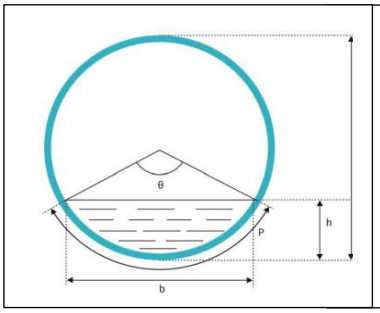
V.4.2 Dimensionnement des buses

Les buses, conduites circulaires en béton, assurent l'écoulement de l'eau sous les infrastructures. Leur dimensionnement se fait en régime saturé à l'aide de la formule de Manning-Strickler. Le diamètre doit être suffisant pour que le débit de crue centennal Q100 soit inférieur au débit à pleine section Qps.

- Selon la formule de Manning-Strickler : $\mathbf{D_{calculé}} = \mathbf{4}^{5/8} \times \left(\frac{Qmax\,(100)}{Ks \times \pi \times I^{1/2}}\right)^{3/8}$

Avec :

- Ks = 70 (Pour le béton)
- Sm = $\pi . (D/2)^2$
- Rh=D/4



b : Largeur de l'écoulement en surface
D : diamètre intérieur de la canalisation
P : Périmètre mouillé modifié
h : hauteur de remplissage de la canalisation
θ : Angle relatif au taux de remplissage

Figure V.8 : Ouvrage hydraulique (buse)

- Il est important de s'assurer que le taux de remplissage des buses reste inférieur à 80 %, afin de permettre un bon écoulement et d'éviter que la conduite fonctionne sous pression (à l'aide d'une méthode itérative).

V.4.3 La vérification des conditions d'auto-curage

Les dépôts dans les eaux usées peuvent causer des nuisances et abîmer les conduites. Le respect des conditions d'auto-curage permet d'éviter ces problèmes.

- **1ère condition** : Lorsque la canalisation fonctionne à plein débit, la vitesse de l'eau doit être supérieure à 1.00 m/s et inférieure à 4.00 m/s**.**
- **2ème condition** : Si le débit représente 10 % du débit à pleine section (Q = 0.1Qps)**,** la vitesse minimale doit être 0.6 m/s**.**
- **3ème condition** : Si le débit tombe à 1 % du débit à pleine section (Q = 0.01Qps)**,** la vitesse minimale doit être 0.3 m/s**.**

♣ **Application numérique**

Pour **BV N°8** au PK **259+448** → Qmax (100) = 3.42 m³/s

On prend: Ks = 70; I = 0.01→ $D_{calculé} = 4^{5/8} \times \left(\frac{3.42}{70 \times \pi \times 0.01^{1/2}}\right)^{3/8} = 1.184$

Donc. $D_{obtenu} = D_{commercial} = 1500$ mm

$Qs = Ks \times Sm \times R^{2/3} \times I^{1/2}$

$Qs = 70 \times (D/2)^2 \times (D/4)^{2/3} \times I^{1/2}$

$Qps = 70 \times (1.5/2)^2 \times (1.5/4)^{2/3} \times 0.01^{1/2} = 6.429$ m³/s

Vps = Qps / Sm = 3.64 m/s

Rq = Qmax / Qps = 0.532

V = Rv ×Vps=3.691 < 4 m/s → c'est vérifiée

Tableau V.11 : Vérification des conditions d'auto-curage de l'ouvrage (BV N°8)

Condition	Rq	Rv	V (m/s)	Vérification
1 m/s < V < 4 m/s	0.532	1.014	3.691	Condition respectée
V > 0.6 m/s	0.1	0.640	2.329	Condition respectée
V > 0.3 m/s	0.01	0.320	1.165	Condition respectée

♣ Voici la liste globale des ouvrages à projeter avec vérification des conditions d'auto curage :

Tableau V.12 : Dimensionnement des buses projetées pour le présent projet

N° BV	PK	Qmax=Q100 (m3/s)	Ks	Pente (m/m)	Dcalculé (mm)	Dretenu (mm)	Sm (m²)	Rh	Qps (m3/s)	Vps (m/s)
BV 1	255+089	3.12	70	0.01	1.144	1500	1.767	0.490	6.429	3.638
BV 2	255+444	3.39	70	0.01	1.180	1500	1.767	0.516	6.429	3.638
BV 3	255+757	3.41	70	0.01	1.183	1500	1.767	0.518	6.429	3.638
BV 4	256+396	12.66	70	0.005	1.934	2000	3.142	0.753	9.791	3.117
BV 5	257+095	1.87	70	0.01	0.944	1500	1.767	0.369	6.429	3.638
BV 6	257+890	0.97	70	0.01	0.738	1200	1.131	0.358	3.546	3.135
BV 7	259+218	19.86	70	0.005	2.290	1500	1.767	0.492	4.546	2.573
BV 8	259+448	3.42	70	0.01	1.184	1500	1.767	0.519	6.429	3.638

BV 9	259+769	6.69	70	0.005	1.523	1500	1.767	0.835	4.546	2.573
BV 10	261+785	1.72	70	0.01	0.915	1200	1.131	0.490	3.546	3.135
BV 11	262+620	8.76	70	0.005	1.684	2000	3.142	0.578	9.791	3.117
BV 12	262+925	0.65	70	0.01	0.635	1200	1.131	0.290	3.546	3.135
BV 13	264+117	3.26	70	0.01	1.163	1500	1.767	0.504	6.429	3.638
BV 14	264+320	3.27	70	0.01	1.164	1500	1.767	0.506	6.429	3.638
BV 15	266+125	2.83	70	0.01	1.103	1500	1.767	0.464	6.429	3.638
BV 16	266+564	2.22	70	0.01	1.007	1500	1.767	0.405	6.429	3.638
BV 17	267+046	3.21	70	0.01	1.156	1500	1.767	0.500	6.429	3.638
BV 18	267+777	4.95	70	0.01	1.360	1500	1.767	0.413	6.429	3.638
BV 19	268+364	2.02	70	0.01	0.972	1500	1.767	0.385	6.429	3.638
BV 20	268+880	1.53	70	0.01	0.876	1200	1.131	0.459	3.546	3.135
BV 21	269+187	5.31	70	0.005	1.396	1500	1.767	0.963	4.546	2.573

Tableau V.13 : Vérification hydraulique de l'auto-curage des buses projetées

N° BV	PK	Rq	Rv	Rh	Hr (mm)	Condition 1	Condition 2 (0.1 Qps)	Condition 3 (0.01 Qps)	Observation
BV 1	255+089	0.485	0.992	0.490	735.0	3.609	3.609	3.609	Vérifié
BV 2	255+444	0.527	1.012	0.516	774.0	3.682	3.682	3.682	Vérifié
BV 3	255+757	0.530	1.013	0.518	777.0	3.686	3.686	3.686	Vérifié
BV 4	256+396	1.293	1.132	0.753	1506.0	3.528	3.528	3.528	Vérifié
BV 5	257+095	0.291	0.865	0.369	553.5	3.147	3.147	3.147	Vérifié
BV 6	257+890	0.274	0.852	0.358	429.6	2.671	2.671	2.671	Vérifié
BV 7	259+218	4.368	0.992	0.492	738.0	2.552	2.552	2.552	Vérifié
BV 8	259+448	0.532	1.014	0.519	778.5	3.689	3.689	3.689	Vérifié
BV 9	259+769	1.472	1.139	0.835	1252.5	2.930	2.930	2.930	Vérifié
BV 10	261+785	0.485	0.992	0.490	588.0	3.110	3.110	3.110	Vérifié
BV 11	262+620	0.895	1.056	0.578	1156.0	3.291	3.291	3.291	Vérifié
BV 12	262+925	0.183	0.760	0.290	348.0	2.383	2.383	2.383	Vérifié
BV 13	264+117	0.507	1.003	0.504	756.0	3.649	3.649	3.649	Vérifié
BV 14	264+320	0.509	1.004	0.506	759.0	3.653	3.653	3.653	Vérifié
BV 15	266+125	0.440	0.968	0.464	696.0	3.522	3.522	3.522	Vérifié
BV 16	266+564	0.345	0.908	0.405	607.5	3.304	3.304	3.304	Vérifié
BV 17	267+046	0.499	1.000	0.500	750.0	3.638	3.638	3.638	Vérifié
BV 18	267+777	0.770	0.916	0.413	619.5	3.333	3.333	3.333	Vérifié
BV 19	268+364	0.314	0.884	0.385	577.5	3.216	3.216	3.216	Vérifié
BV 20	268+880	0.431	0.963	0.459	550.8	3.019	3.019	3.019	Vérifié
BV 21	269+187	1.168	1.118	0.963	1444.5	2.876	2.876	2.876	Vérifié

Tableau V.14 : Liste des ouvrages à projeter

N° BV	PK	Surface (km^2)	Qmax=Q100 (m3/s)	Ouvrage projeté	Dimension	Nbre de cellule
BV 1	255+089	0.161	3.12	Buse	Ø1500	1
BV 2	255+444	0.347	3.39	Buse	Ø1500	1
BV 3	255+757	0.363	3.41	Buse	Ø1500	1

BV 4	256+396	3.274	12.66	Buse	Ø2000	2
BV 5	257+095	0.117	1.87	Buse	Ø1500	1
BV 6	257+890	0.029	0.97	Buse	Ø1200	1
BV 7	259+218	8.687	19.86	Buse	Ø1500	6
BV 8	259+448	0.293	3.42	Buse	Ø1500	1
BV 9	259+769	0.903	6.69	Buse	Ø1500	2
BV 10	261+785	0.357	1.72	Buse	Ø1200	1
BV 11	262+620	2.65	8.76	Buse	Ø2000	2
BV 12	262+925	0.03	0.65	Buse	Ø1200	1
BV 13	264+117	0.28	3.26	Buse	Ø1500	1
BV 14	264+320	0.185	3.27	Buse	Ø1500	1
BV 15	266+125	0.211	2.83	Buse	Ø1500	1
BV 16	266+564	0.106	2.22	Buse	Ø1500	1
BV 17	267+046	0.202	3.21	Buse	Ø1500	1
BV 18	267+777	0.68	4.95	Buse	Ø1500	2
BV 19	268+364	0.14	2.02	Buse	Ø1500	1
BV 20	268+880	0.082	1.53	Buse	Ø1200	1
BV 21	269+187	1.01	5.31	Buse	Ø1500	1

♣ **Interprétation des résultats :**

L'étude a porté sur 21 bassins versants identifiés le long du tracé. Chacun de ces bassins présente des caractéristiques morphologiques distinctes, influençant directement leur comportement hydrologique en cas de pluie intense.

Le trace comprend un total de 21 ouvrages hydrauliques(buses) répartis comme suit :

- 15 buses de diamètre 1500 mm.
- 2 buses de diamètre 2000 mm.
- 4 buses de diamètre 1200 mm.

Les débits centennaux ont été calculés avec la formule rationnelle (car S < 10 km²). Ils varient entre 0.65 et 19.86 m³/s selon la surface, la pente et le ruissellement.

Les diamètres des buses ont été déterminés pour évacuer les Q100 en régime saturé, tout en assurant un bon écoulement et un remplissage inférieur à 80 %.

Les buses sont bien dimensionnées, respectent les vitesses minimales, et fonctionneront correctement même en cas de forte pluies.

V.4.4 Drainage longitudinal

La conception d'une voie ferrée doit tenir compte des risques d'érosion causés par les eaux de pluie. Selon le relief (remblai ou déblai), l'eau est évacuée par des fossés, caniveaux ou descentes sur les talus.

Le dimensionnement d'un fossé collecteur dépend du débit d'eau qu'il doit évacuer, tout en respectant la stabilité du sol et en évitant l'érosion. Dans le cas des voies ferrées, les fossés sont essentiels pour

évacuer les eaux de pluie le long des rails, surtout en zone de remblai ou de déblai. Ils sont placés de chaque côté de la voie pour drainer efficacement le ruissellement vers un exutoire.

Leur conception doit suivre la pente du terrain, éviter les profondeurs excessives, assurer un bon écoulement même en cas de forte pluie, et permettre un séchage rapide. Le tout doit rester économique, facile à entretenir, et respectueux de l'environnement.

V.4.4.1 Dimensionnement des fossés

Le dimensionnement des fossés destinés à l'évacuation des eaux pluviales autour des voies ferrées s'effectue à l'aide de la formule de Manning-Strickler, qui permet de calculer le débit admissible en tenant compte de la géométrie du fossé, de sa rugosité et de sa pente longitudinale :

$Qs = Ks \times Sm \times R^{2/3} \times I^{1/2}$ et $Rh = Sm/Pm$

Où :

- Rh : rayon hydraulique
- Sm : surface mouillée Sm=(b+z.h).h
- Pm : périmètre mouillé $Pm=b+2.h\sqrt{1+z^2}$
- I : pente longitudinale (≥ 0.002 m/m)
- z : pente des berges

Pour définir les dimensions des fossés dans le cadre de ce projet, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- En zone de déblai, la pente longitudinale des fossés est supposée équivalente à celle du profil en long de la voie ferrée.
- Le fossé est modélisé avec un profil trapézoïdal, caractérisé par une pente de talus exprimée en ratio Hauteur/Vertical (H/V).
- Le débit total à évacuer correspond à la somme des contributions hydrauliques des différentes surfaces : la plateforme, les bermes et les talus, soit : Q=Qpf+Qt+Qb.
- Le coefficient de rugosité de Strickler utilisé est Ks = 70.
- Le dimensionnement est réalisé en prenant en compte le cas le plus défavorable, c'est-à-dire une situation où un remblai ou un déblai s'étend sur une longue distance et présente une hauteur significative. Ce cas critique permet de garantir le bon fonctionnement des ouvrages même sous fortes sollicitations hydrauliques.

La formule de base utilisée pour ces calculs est la formule rationnelle, adaptée aux petits bassins versants :

- Q10= 0.278 x C x I x A (T=10 ans) → Les fossés ont été dimensionnés pour une pluie décennale et pour un débit de fuite de 1 l/s/ha.
- Q10= Débit décennal (en m^3/s)
- C= coefficient de ruissellement (=0.8 plateforme, =0.4 talus, =0.6 Berme)

- I= Intensité de pluie (mm/h)
- A= Surface du bassin versant en km² (la plate-forme ; les talus; les bermes).

V.4.4.2 Exemple appliqué au projet

D'après l'analyse du profil en travers ainsi que des caractéristiques du terrain naturel, le type de fossé retenu pour assurer l'évacuation des eaux est le type 01 selon la figure V.9 :

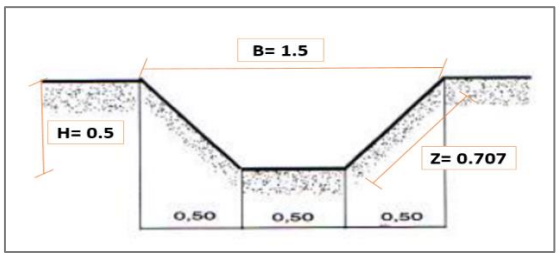


Figure V.9 : Fossé trapézoïdal type 01

Avec :

- b = 0.5m ; h = 0.5m ; z = 0.707m
- Sm = (b + z × h) × h = 0.427 m²
- Pm = b + 2h $\sqrt{1 + z^2}$ = 1.725 m

Tableau V.15: Dimensions du fossé Type 1

Type	i (m/m)	z (m)	b (m)	h (m)	Sm (m²)	Pm (m)	Rh	Ks	Qs (m3/s)	Vps condition 1 (m/s)
1	0.02	0.707	0.5	0.5	0.427	1.725	0.247	70	1.665	3.90

♣ Le cas le plus défavorable en déblai correspond à une hauteur maximale (Hmax) de 12.48 m, une longueur totale de 1250 m, et une largeur de plateforme de 6.8 m.

Tableau V.16: Calcul du débit évacuer dans le cas le plus défavorable

Paramètre	Plateforme	Talus	Berme
Cr	0.8	0.4	0.4
P (m/m)	0.04	2/3	0.04
S (Km²)	0.0085	0.0349	0.00146
Tc (h) Ventura	0.0585	0.0918	0.076
I (mm/h) avec b= 0.8 Et a=27.35 (t=10 ans)	264.99	184.65	213.890
Q (m³/s)	0.501	0.7166	0.034
Qtotal (m³/s)	1.252		
Qps	1.664		
Vérification Qps>Qtotal	**C'est vérifié**		
Vérification Vps < 4m/s	**C'est vérifié**		

♣ Donc, on constate que le fossé adopté pour le projet est :

- Hauteur : h= 0.5 m
- Base : b= 0.5 m
- Largeur : B=1.5 m

V.5 Conclusion

L'étude hydraulique menée dans la région du projet étudié nous a permis d'évaluer les risques liés aux crues en milieu aride et de dimensionner les ouvrages nécessaires pour protéger l'infrastructure ferroviaire. En combinant les méthodes hydrologiques et hydrauliques, nous avons pu concevoir des solutions adaptées aux spécificités locales.

Ce travail nous a montré l'importance de prendre en compte le climat, le terrain et les risques d'inondation pour assurer la sécurité et la durabilité des infrastructures.

CHAPITRE VI

Étude géologique et géotechnique

VI. Étude géologique et géotechnique

VI.1 Introduction

Avant d'entreprendre tout projet de construction ferroviaire, il est essentiel de vérifier si le terrain est capable de supporter durablement les infrastructures prévues. C'est pourquoi une étude géologique et géotechnique s'impose. Ce chapitre a pour objectif de présenter les principales caractéristiques géologiques et géotechniques de la zone concernée par le projet, notamment au niveau du tronçon compris entre le PK 255+000 et le PK 270+000.

Cette étude guide le choix des solutions techniques les plus adaptées. Elle constitue ainsi une étape clé pour garantir la sécurité, la performance et la longévité de l'infrastructure ferroviaire.

VI.2 Étude géologique

L'étude géologique permet de connaître la nature des sols et des roches traversées par le tracé, leur origine et leur évolution au fil du temps. Elle aide à repérer les zones à risque comme les glissements de terrain, les nappes d'eau souterraines ou les zones inondables, et à identifier les matériaux présents sur place. Elle donne aussi une vue d'ensemble sur les mouvements naturels (comme les failles ou l'érosion), ce qui permet d'adapter le projet aux conditions du terrain.

VI.2.1 Aperçu géologique régionale

La zone étudiée se trouve dans le sud-ouest algérien, dans une région appelée la plateforme saharienne. Elle contient des roches très anciennes, depuis le Précambrien jusqu'à aujourd'hui. Le tracé traverse le sillon ougartien, une zone instable formée de roches volcaniques anciennes recouvertes par des couches sédimentaires épaisses.

Cette zone est divisée en deux parties (Saoura et Daoura), séparées par l'Erg Er Raoui. Elle se prolonge vers le Maroc et l'Anti-Atlas. Elle est entourée de déserts (Erg Iguidi, Erg Chech), de plateaux (Kem Kem, Tadmaït), et de hamadas comme celle du Guir.

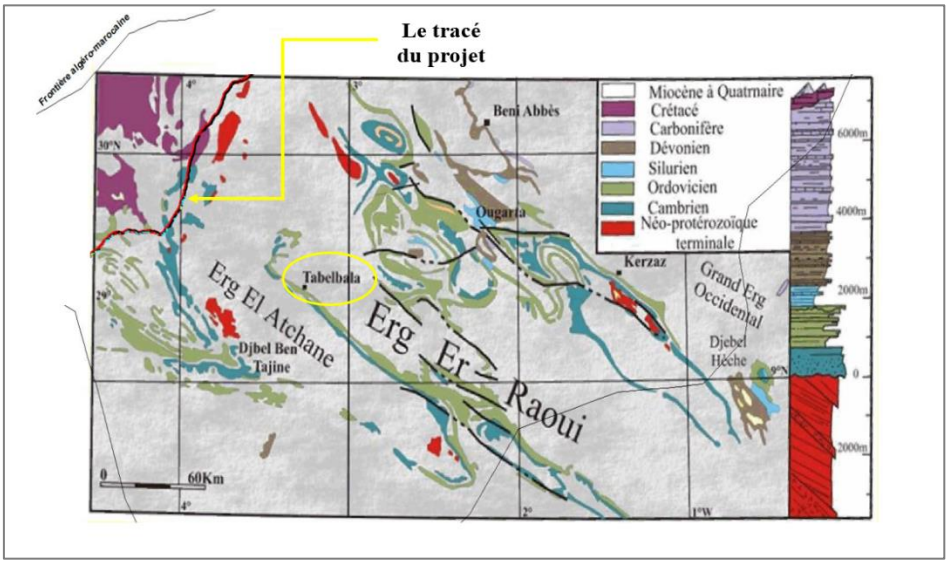


Figure VI.1 : Extrait de la carte géologique de la région

VI.2.2 Aperçu géologique local

Le tracé de la voie ferrée entre le PK 255+000 et le PK 270+000 traverse un substratum rocheux ancien composé de roches conglomératiques et de calcaires gréseux, attribués au Crétacé du plateau de Kem Kem. Ces formations représentent la base géologique solide de la région. Elles indiquent une origine sédimentaire ancienne, déposée dans des environnements continentaux ou côtiers.

La zone étudiée présente une géologie variée, avec une alternance entre des terrains durs du Crétacé et des formations meubles plus récentes comme les sables et les argiles. Le tracé de la voie ferrée traverse principalement des formations quaternaires anciennes et récentes, témoignant des différentes étapes de formation du sol.

- ♣ Voici répartition des formations géologiques le long du tracé

Tableau VI.1 : Description géologique de tronçon étudié

Localisation	Description lithologique	Famille Géologique
PK 256+200 à PK 263+450	Formations villafranchiennes et pliocènes de la Hamada du Guir	pVC1
PK 263+450 à PK 267+800	Argiles conglomératiques, grès, calcaires lacustres du tertiaire	mC
PK 267+800 à PK 270+000	Argiles conglomératiques, grès, calcaires lacustres du tertiaire	mC

VI.2.3 Hydrogéologie le long du tracé

La zone traversée présente un relief marqué par quelques oueds, même si leur activité reste faible dans ce tronçon. Ces écoulements, comme l'oued Sobti plus à l'est, montrent que la région peut connaître des écoulements temporaires.

Sur le plan hydrogéologique, le secteur fait partie de l'unité Saoura–Tindouf. On y trouve des nappes profondes comme celle des grès du Cambro-Ordovicien, connues pour leurs bons débits. Il existe aussi des nappes plus proches de la surface dans certaines zones, exploitées par des puits ou foggaras.

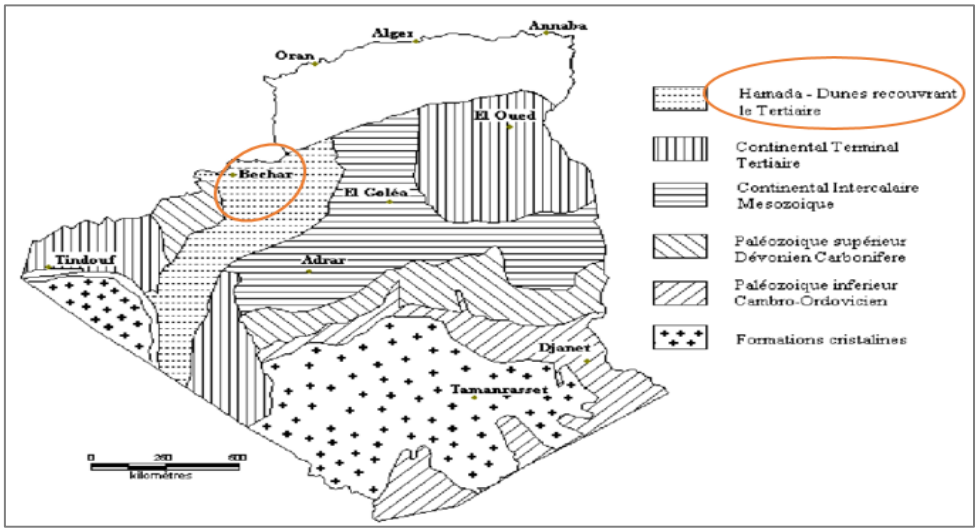


Figure VI.2 : Carte hydrogéologique du Sahara algérien d'après (Mehdid A.1988)

♣ Le tracé étudié passe surtout par la région des Hamadas, connue pour son relief plat et rocheux, ainsi que par des terrains anciens qui appartiennent au Paléozoïque supérieur.

VI.2.4 Contraintes géologiques

Dans la partie située entre PK 255 et PK 270, le tracé traverse des zones présentant plusieurs contraintes :

- Deux zones sensibles aux inondations : la première entre PK 258+975 et PK 259+175, et la deuxième entre PK 266+650 et PK 267+650. Ces secteurs peuvent être touchés par des crues d'oueds. Des buses ont déjà été prévues pour évacuer l'eau.
- Le tracé est exposé au sable transporté par le vent, surtout près des reliefs, de la végétation, des oueds et des dépressions (dayas), où le sable a tendance à s'accumuler. Même si la zone la plus touchée par l'ensablement se trouve un peu plus loin, entre PK 273+500 et PK 275+700, elle reste proche du projet. Avec le temps, ce sable pourrait se déplacer vers la voie ferrée et poser des problèmes. Il faudra donc surveiller régulièrement la zone, surtout que le tracé passe aussi près de l'Erg Er Raoui entre PK 245+500 et PK 249+000.

VI.3 Étude géotechnique

L'étude géotechnique commence par une reconnaissance du sol, dont l'objectif est d'identifier les différentes couches du terrain et de comprendre la configuration générale du site. Cette étape permet de collecter des données sur les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des sols.

Elle sert ensuite à évaluer la capacité du terrain à supporter les charges liées à la construction d'une voie ferrée, à repérer d'éventuels risques naturels et à concevoir des fondations adaptées pour garantir la stabilité et la sécurité de l'ouvrage.

Tableau VI.2 : Méthodes usuelles de reconnaissance géotechnique

Problématique géotechnique	Sondages	Essais en laboratoire	Essais in situ
Modèle géologique	-Sondage carotté -Pelle mécanique -Tarière -Sondages destructifs avec diagraphies	-Essais d'identification et de classification	-Pénétromètre statique, piézocône -Standard Penetration Test -Pénétromètre dynamique
Terrassement / réemploi Déblai / Remblai Stabilité générale	-Échantillon intact ou remanié représentatif, -prélevé dans les sondages précédents	-Essais d'identification Essais Proctor, de traitements Essai triaxial et Cisaillement rectiligne	-Scissomètre -Phicomètre

VI.3.1 Programme d'investigation géotechnique du site

Les investigations géotechniques sont adaptées au type de projet et aux caractéristiques du sol. Elles se déroulent par étapes et font appel à différentes méthodes pour analyser le terrain. Dans ce projet, des essais in situ et en laboratoire ont été réalisés afin de mieux connaître la nature du sol et d'assurer la stabilité des futures fondations.

VI.3.1.1 Essais in situ

Conformément à la norme **XP P 94-010**, les essais in situ désignent l'ensemble des opérations permettant de déterminer sur le site même en surface ou en profondeur, une ou plusieurs grandeurs caractéristiques d'un matériau.

- ♣ Une étude géotechnique a été réalisée dans la zone concernée, intégrant diverses investigations menées directement sur le site. Les principaux essais in situ effectués sont les suivants :

Tableau VI.3 : Essais de reconnaissance in situ

Type d'essai	Définition	Objectif	Cas étudié le long du tracé
Puits de reconnaissance	C'est un petit trou creusé à la main ou à la machine, de faible profondeur, qui permet d'observer directement les couches de sol et de prélever des échantillons.	- Rechercher le substratum sous la couche de sol superficielle. -Évaluer l'épaisseur de la zone altérée du substratum. -Prélever des échantillons pour des essais mécaniques en laboratoire.	6 puits ont été réalisés d'une profondeur de 4 mètres sur différents points du tracé.
Sondage carotté	Une méthode géotechnique qui consiste à extraire un cylindre de sol le plus intact possible (appelé carotte) afin de permettre l'observation directe des couches de terrain et de réaliser des essais en laboratoire.	-Une description précise des couches du sol (lithologie des couches traversées). -Des échantillons utilisables pour des analyses mécaniques, telles que la résistance et la déformation.	4 sondages ont été réalisés, avec des prélèvements d'échantillons jusqu'à une profondeur de 10 mètres.
Essai au pénétromètre dynamique lourd (PDL)	Une méthode géotechnique qui consiste à enfoncer des tiges métalliques avec une masse tombante et à compter le nombre de coups nécessaires pour atteindre une certaine profondeur.	-Déterminer la profondeur des couches porteuses -Evaluer la résistance mécanique du sol	Effectué en 6 points le long du tracé, jusqu'à atteinte du refus.

- La localisation des sondages et essais in situ effectués du projet étudié est présentée en annexe (voir Annexe D).

VI.3.1.2 Essai au laboratoire

Conformément à la norme **XP P 94-010**, les essais en laboratoire désignent l'ensemble des opérations permettant de déterminer en laboratoire une ou plusieurs caractéristiques d'un matériau à partir d'échantillons prélevés sur le terrain ou reconstitués.

- Une étude géotechnique a été menée dans la zone concernée, comprenant plusieurs analyses effectuées en laboratoire. Les principaux essais de laboratoire réalisés sont les suivants :

Tableau VI.4 : Essais au laboratoire sur les échantillons prélevés

Catégorie d'essai	Type d'essai	Norme associée
Essais d'identification	Analyse granulométrique Densité sèche & Teneur en eau Plasticité (WL, WP, IP) Limites d'Atterberg Essai au bleu de méthylène	NF EN 933-1 NF P 94-050 P94-051 NFP 94-051 / NFP 94-052-1 NFP 94-068
Analyse chimique	Teneur en carbonates Teneur en sulfates	XP P 94-011 NF P 18-011
Essais mécaniques	Caractéristiques Œdométriques Essai Proctor Indice CBR Immédiat	XP P 94-090-1 NF-94 093 NF-94 078

VI.3.1.3 Coupe lithologique

- Les puits de reconnaissance ont permis d'identifier la nature et la composition des différentes couches de sol, offrant ainsi une vision claire de la structure géologique le long du tracé.

Tableau VI.5 : Résultats des puits de reconnaissance

Sondage	Localisation	Profondeur (m)	Description lithologique du site d'étude	Photos
PU 01	PK 257+000	00.00 – 00.20	Remblai	
		00.20 – 01.30	Sable carbonaté gypseux	
		01.30 – 01.50	Dalle calcaire indurée	
PU 02	PK 259+891	00.00 – 00.20	Remblai	
		00.20 – 01.30	Grès calcaire enrobé dans une matrice sableuse argileuse	
		01.30 – 01.50	Dalle gréseux calcaire	

PU 03	PK 262+907	00.00 – 00.20	Remblai (sable)	
		00.20 – 00.60	Sable argileux rougeâtre	
		00.60 – 01.20	Calcaire dolométisé dans une matrice sableuse argileuse	
PU 04	PK 265+100	00.00 – 00.30	Remblai (sable)	
		00.30 – 01.30	Grès calcaire enrobé dans une matrice sableuse argileuse	
		01.30 – 01.50	Dalle gréseuse calcaire	
PU 05	PK 267+700	00.00 – 00.20	Remblai (sable)	
		00.20 – 00.80	Grès calcaire enrobé dans une matrice sableuse argileuse	
		00.80 – 00.90	Dalle gréseuse calcaire	
PU 06	PK 269+500	00.00 – 00.20	Remblai (sable)	
		00.20 – 01.00	Sable carbonaté avec passage de grains de grès	
		01.00 – 01.20	Calcaire dolométisé dans une matrice sableuse argileuse	

- Les sondages carottés permettent d'observer la stratigraphie en profondeur et de prélever des échantillons intacts pour les essais en laboratoire:

Tableau VI.6: Résultats des sondage carottés

Sondage	Localisation	Profondeur (m)	Formation géologique	Photos
SC 1	PK 258+600	0.0 – 0.9	Sable limoneux jaunâtre peu graveleux	
		0.9 – 5.0	Grès marneux consolidé en état fragmenté devenant altéré à la base	
		5.0 – 8.0	Grès marneux consolidé en état fragmenté devenant altéré à la base	

SC 2	PK 259+175	0.0 – 1.2	Sable moyen graveleux brunâtre	
		1.2 – 5.9	Encroûtement gréseux-calcaire blanchâtre	
		5.9 – 9.0	Calcaire gréseux micro-conglomératique en état fragmenté	
SC 3	PK 263+625	0.0– 2.5	Sable fin limoneux peu graveleux jaunâtre	
		2.5 – 5.0	Sable moyen à grossier sombre	
		5.0 – 10.0	Grès altéré friable peu marneux à inclusion caillouteux devenant consolidé à la base	
SC 4	PK 264+175	0.0 – 1.6	Sable fin à moyen peu limoneux jaunâtre	
		1.6– 3.0	Grès altéré friable blanchâtre	
		3.0 – 8.0	Encroûtement gréseux à inclusion caillouteux peu consolidé à passées dures à la base	

VI.3.2 Interprétation des résultats des investigations géotechniques

Dans le cadre du projet, une synthèse des essais de laboratoire sur les échantillons prélevés a été établie. Elle inclut la classification des sols selon les normes GTR et UIC 719 R, afin d'évaluer leurs propriétés géotechniques

- ♣ Voici les essais réalisés dans le cadre du projet, présentés dans le Tableau VI.7 et le Tableau VI.8.

Tableau VI.7 : Résultats des essais de laboratoire réaliser sur les puits

Puits	Localisation	Profondeur (m)	Analyse granulométrie			Limites d'atterberg			VBS	Proctor modifié		CBR	Classification GTR	Classification UIC
			% ≤ 2mm	% ≤ 0,08mm	% ≤ 2 µm	WL	WP	IP		Wopm(%)	γdmax (t/m³)			
P01	257+000	1.50	73%	11.00%	/	/	/	/	0.10	10.0	2.05	14.70	B3	QS2
P02	259+891	1.50	49%	17.40%	/	28	18	10	0.20	8.10	2.00	11.02	B5h	QS2
P03	262+907	1.20	73%	32.67%	/	31	19	12	0.18	10.6	1.80	13.84	B5h	QS2
P04	265+100	1.50	42%	12.29%	/	28	18	10	0.20	6.40	2.09	13.35	B5h	QS2
P05	267+700	0.90	64%	24.13%	/	29	17	12	0.61	6.80	2.07	14.70	B5h	QS2
P06	269+500	1.20	76%	32.9%	/	31	15	16	0.36	11.4	1.81	11.95	B5h	QS2

- **Classification pour puits 02 :**

  % < 0,08 mm=17,40%≤35% ⇒ Classe B *(*sols sableux et graveleux avec fines*)*

  VBS=0,22≤1,5 ⇒ Sous-classe B5 (graves silteuses) et IP=10 ⇒ sol humide ⇒ B5h

- Selon les critères de la norme ferroviaire UIC 719R, le sol du puits P02 est classé dans la catégorie QS2, correspondant aux sols moyens.

Tableau VI.8 : Résultats des essais de laboratoire réalisés sur les échantillons des sondages carottés

Sondage	Localisation	Profondeur (m)	Yh (t/m³)	Yd (t/m³)	W (%)	Sr (%)	Ip (%)	WL (%)	$CaCO_3$ (%)	%Fines <80 µ	Sulfates mg/kg	Agressivité (classe)
SC 01	PK 258+600	0.0-0.9	/	/	/	/	6.90	19.5	10.3	32	Nul	/
		0.9-3.0	1.92	1.88	2.46	15	49.3	28.3	33.6	66	7790	XA2
		5.0-7.0	1.77	1.76	0.8	4	13.4	36.2	10.3	33	3977	XA2
SC 02	PK 259+175	0.0-1.2	/	/	/	/	9.00	27.5	16.8	18	Nul	/
		1.2-3.0	2.23	2.23	0.0	0.0	12.6	38.2	21.0	19	2296	XA1
SC 03	PK 263+625	0.0-2.5	/	/	/	/	N.M	N.M	9.30	19	Nul	/
		2.5-5.0	/	/	/	/	8.00	26.4	12.2	12	Nul	/
		5.0-7.0	/	/	/	/	36.4	66.5	11.7	47	3649	XA2
SC 04	PK 264+175	0.0-1.6	/	/	/	/	N.M	N.M	10.3	20	Nul	/
		1.6-3.0	/	/	/	/	15.1	39.2	26.2	27	2583	XA1
		3.0-5.0	2.25	2.25	0	0	27.8	69.8	39.3	41	6314	XA2

- Les sols rencontrés sont majoritairement sableux à graveleux avec fines (passant à 80 µm ≤ 35 %), ce qui les classe globalement en classe B (selon GTR).
- Parmi eux, les sols B3 sont insensibles à l'eau, peu érodables et peuvent être utilisés dans toutes les conditions météorologiques avec un compactage moyen.
- Les sols B5h, en revanche, sont faiblement portants et particulièrement sensibles au matelassage, notamment en présence d'humidité. Leur mise en œuvre nécessite des précautions spécifiques selon les conditions climatiques (traitement, compactage réduit ou aération préalable).
- Les valeurs de bleu de méthylène (VBS ≤ 1,5) confirment que les fines présentes sont principalement silteuses et non argileuses, ce qui favorise une meilleure stabilité à l'eau et réduit les risques de gonflement.
- Les essais Proctor modifié montrent une bonne aptitude au compactage, avec des densités sèches maximales élevées, favorisant une mise en œuvre efficace en remblai.
- Les valeurs de CBR > 11 % indiquent une portance moyenne à bonne, suffisante pour la réalisation de remblais ferroviaires dans la majorité des cas.

VI.3.3 Zones à risques

Tableau VI.9 : Présentation des zones à risques

Type de risque	Localisation	Causes	Mesures
Zone inondable	A partir des observations réalisées sur le terrain et de l'analyse du réseau hydrographique, aucune zone présentant un risque d'inondation n'a été repérée dans la zone étudiée.		
Inondation	Pk 258+975 – Pk 259+175	Traversée d'un large lit d'oued	Aménagements hydrauliques, rehaussement de la plateforme, drainage transversal
	Pk 266+650 – Pk 267+650	Risque de débordement de lit d'oued	
Ensablement	Le tracé est exposé à un risque d'ensablement dû au transport éolien, en particulier près des reliefs, oueds, végétation et dépressions. Bien que la zone d'accumulation la plus marquée soit localisée entre PK 273+500 et PK 275+700		L'ensablement peut être limité par des filets brise-vent, la végétalisation, des tranchées pièges, des murs latéraux et un entretien régulier de la voie.
Agressivité des sol	PK 258+600	La présence de sols classés XA1 à XA2 indique une agressivité chimique croissante.	Utilisation de ciments CRS, adjuvants hydrofuges (résistants aux sulfates).
	PK 263+625		
	PK 264+175		

VI.3.4 Gites d'emprunts et carrières

Un gîte d'emprunt est un terrain naturel utilisé temporairement pour extraire des matériaux comme la terre, le sable ou le gravier, nécessaires aux travaux de construction ou de terrassement. Le choix du gîte se fait en fonction de la qualité des matériaux, de sa proximité par rapport au chantier, et de son impact sur l'environnement.

L'exploitation d'un gîte passe par plusieurs étapes : on commence par définir les besoins du chantier, puis on identifie les sites possibles et on réalise des études pour vérifier la qualité des matériaux. Une fois les autorisations obtenues, on procède à l'extraction, au transport, puis à la remise en état du site pour éviter les dégradations.

En parallèle, les matériaux récupérés lors des déblais peuvent être réutilisés sur le chantier, notamment en remblai ou en couche de forme. Mais cela n'est possible que s'ils sont traités correctement (compactage, séchage, stabilisation) pour garantir une bonne stabilité, surtout dans les projets ferroviaires où les contraintes techniques sont très importantes.

Tableau VI.10 : Caractéristiques et conditions d'utilisation des matériaux de gite

Gîte d'emprunt proposé	Matériaux de gîte	Classe GTR	Classe UIC	Utilisation en remblai	Utilisation en couche de forme
Gîte n°1PK 243+000	Encroutement gréseux-calcaire	B5	QS2	Utilisable après concassage et traitement	Utilisable après concassage, criblage et traitement

VI.4 Conclusion

L'étude géologique et géotechnique réalisée dans le cadre du présent projet a confirmé que le sol est globalement adapté à la construction d'une voie ferrée. Les résultats mettent en évidence la présence de sols bien portants, majoritairement classés B3 et B5h selon la norme GTR, et QS2 selon la norme UIC. Certaines contraintes naturelles ont été identifiées, mais elles peuvent être maîtrisées par des solutions techniques appropriées.

Enfin, des matériaux disponibles localement peuvent être réutilisés après traitement, ce qui représente un avantage pour l'économie du projet.

CHAPITRE VII

Assise ferroviaire

VII. Assise ferroviaire

VII.1 Introduction

L'assise ferroviaire est l'un des éléments clés qui assurent la stabilité et la performance d'une voie ferrée. Elle supporte l'ensemble de la structure et transmet les charges des trains vers le sol. Elle doit donc être conçue avec soin pour garantir la tenue de la voie dans le temps, notamment avec l'augmentation des vitesses et des charges ferroviaires.

On distingue deux types d'assises : rigides et flexibles. Dans ce travail, nous nous intéresserons aux structures flexibles, couramment utilisées dans les voies classiques.

Ce chapitre vise à présenter les principes de base de l'assise ferroviaire, les matériaux utilisés, ainsi que les méthodes de dimensionnement adaptées pour assurer solidité et fiabilité à long terme.

VII.2 Éléments constitutifs de l'assise ferroviaire

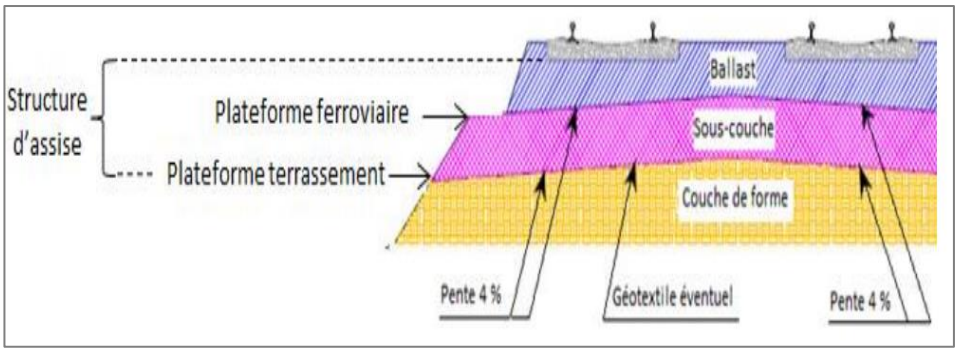


Figure VII.1 : Composantes des voies ferrées ballastées

VII.2.1 Ballast

Le ballast est un élément fondamental de la superstructure ferroviaire, défini par la norme NF EN 13450 (AFNOR, 2003) comme un granulat issu du concassage de roches dures. Il est généralement utilisé dans une granulométrie 25/50 mm, bien que des fractions plus fines (10/25 mm) soient parfois employées pour les corrections de nivellement. En Algérie, cette classe granulométrique est la plus répandue selon les spécifications de la SNTF. Le rôle du ballast est d'assurer :

- Le maintien du châssis de la voie par un ancrage efficace des traverses dans le sens longitudinal tout en garantissant la résistance transversale de la voie.
- Le calage vertical des traverses pour obtenir la géométrie recherchée avec une grande précision.
- La transmission et la répartition, sur la plateforme, des charges exercées par les circulations.
- L'amortissement des vibrations.
- L'élasticité de la voie.
- Le drainage rapide des eaux.

Pour remplir efficacement ces fonctions, le ballast doit répondre à des caractéristiques précises :

1. **Propriétés mécaniques**

- **Perméabilité** : indispensable pour évacuer l'eau et éviter la formation de boue sous les traverses.
- **Élasticité** : assurée par la mobilité relative des grains, sans formation de couche compacte.
- **Solidité** : résistance élevée à la compression (RC > 14 kN/cm²) et aux chocs répétitifs.
- **Résistance à l'usure (attrition)** : mesurée par l'essai Micro-Deval à sec (DS ≥ 14 pour les roches dures, DS ≥ 12 pour les roches carbonatées) et humide (DH ≥ 6).
- **Résistance aux chocs et à la fragmentation** : mesurée par l'essai Los Angeles (LA), avec un coefficient maximal recommandé de 25 %.

2. **Propriétés physiques**

- **Granulométrie contrôlée** : homogène, sans particules fines qui colmateraient les interstices.
- **Forme anguleuse et rugueuse** : pour favoriser l'emboîtement et l'ancrage des traverses.
- **Densité suffisante** : afin de lester la voie et résister aux efforts verticaux et latéraux.
- **Propreté** : absence d'impuretés, de matières organiques ou de débris**.**
- **Dureté globale (DRG)** : doit dépasser 17 pour les lignes classiques selon les normes UIC.

♣ Dans les zones désertiques, comme c'est le cas dans plusieurs régions algériennes, le sable transporté par le vent s'infiltre facilement dans la couche de ballast. Cela altère sa perméabilité et diminue sa capacité portante. Il est donc nécessaire de prévoir un entretien régulier ainsi que des dispositifs de protection tels que des écrans coupe-vent.

VII.2.2 Sous couche

C'est une couche destinée à supporter le ballast, comme elle est située directement sous le ballast, on l'appelle « sous-couche ». Selon l'article 3 de la norme IC0045, elle se compose, du haut vers le bas, des éléments suivants :

La couche sous-ballast : C'est une grave propre bien graduée (0/31,5 mm), comportant au moins 30 % de matériaux concassés. Elle est compactée à 100 % de l'OPN (Optimum Proctor Normal) et présente un Degré de Réaction Global (DRG) supérieur à 12. Elle est systématiquement mise en œuvre, y compris sur des plate-formes rocheuses, où elle joue un rôle d'égalisation et atténue la rigidité excessive de l'assise.

La couche de fondation (selon le sol) : C'est une couche de grave bien graduée, compactée à 100 % OPN, d'épaisseur minimale de 15 cm et présentant un DRG > 10. Elle est mise en place pour faciliter la

circulation des engins de chantier, notamment lorsque la sous-ballast est réservée à la phase finale du chantier. Elle est surtout requise en cas de portance insuffisante du sol.

La couche anti-contaminante (si nécessaire) : Elle est constituée de sable moyen propre (épaisseur ≥ 15 cm), éventuellement complétée par un géotextile ou une géomembrane. Qui agissent comme barrières filtrantes : ils empêchent la migration des fines vers les couches supérieures tout en laissant passer l'eau, contribuant ainsi à la stabilité et à la durabilité de la structure.

La sous-couche joue un rôle important dans la performance et la durabilité de la structure ferroviaire. Ses fonctions principales sont les suivantes :

- Protection contre l'érosion (ballast et ruissellement).
- Protection contre le gel.
- Répartition uniforme des charges.
- Évacuation efficace des eaux et réduction des vibrations transmises à la plate-forme.

VII.2.3 Plate-forme

C'est la partie supérieure de la structure en terre et sert de support direct à la voie ferrée. Elle accueille la sous-couche et joue un rôle essentiel dans la stabilité, la performance et la durabilité de l'infrastructure.

Elle doit résister aux efforts statiques (poids des trains à l'arrêt) ainsi qu'aux efforts dynamiques (vibrations, accélérations). Sa stabilité dépend principalement de la nature du sol, de sa teneur en eau et des charges appliquées par le trafic ferroviaire.

Elle remplit plusieurs fonctions techniques fondamentales :

- Répartir les charges transmises par les trains sur une surface aussi large que possible.
- Évacuer les eaux de pluie pour éviter leur infiltration dans la structure.
- Empêcher la remontée des particules fines (limons, argiles) vers le ballast.
- Amortir les vibrations liées au passage des trains.
- Assurer le drainage efficace des eaux souterraines.

La plate-forme peut être réalisée soit en déblai, lorsque le sol naturel présente des caractéristiques géotechniques suffisantes, soit en remblai, à l'aide de matériaux rapportés issus des déblais du projet ou de sources extérieures.

VII.2.1 Classification des sols et des plates-formes

La qualité d'un sol utilisé pour la construction de la plate-forme dépend de deux paramètres essentiels qui sont :

- La nature géotechnique du sol
- Les conditions hydrogéologiques sont considérées comme bonnes lorsque la couche supérieure du sol est hors de la nappe phréatique, qu'il n'existe aucune infiltration

d'eau nuisible à travers le sol, et que le drainage des eaux de pluie est correctement assuré.

Les sols sont classés en quatre catégories de qualité notées QS :

- **QS0** : Sols impropres, nécessitant des mesures correctives (remplacement, stabilisation aux liants, géotextiles, drainage, renforcement par pieux, etc.) ;
- **QS1** : Sols médiocres, acceptables sous réserve d'un drainage efficace et éventuellement améliorables par traitement ;
- **QS2** : Sols moyens, offrant une performance correcte sans traitement particulier ;
- **QS3** : Bons sols, avec une rigidité naturelle élevée (supérieure à 80 MPa), parfaitement adaptés aux plateformes ferroviaires.

♣ **Remarque** : L'analyse se concentre sur la Partie Supérieure du Terrassement (PST), soit le mètre supérieur du sol. En cas de sol meuble, un traitement à la chaux peut être appliqué pour améliorer sa portance. On obtient alors une structure en deux couches, la couche supérieure étant de meilleure qualité.

La portance d'une plate-forme dépend de deux éléments principaux :

- La qualité du sol support (en place ou rapporté)
- La qualité et l'épaisseur de la couche de forme, si elle est présente.

En fonction de ces paramètres, trois classes de portance sont définies :

- P1 : Plate-forme médiocre
- P2 : Plate-forme moyenne
- P3: Plate-forme de bonne portance, adaptée à des charges d'exploitation importantes.
- **Tableau VII.1 : Classe de portance de la plateforme selon la norme UIC 719 R (réf. page 16)**

Classe de qualité du sol	Classe de portance de la plateforme	Couche de forme à mettre en œuvre pour avoir cette portance	
		Qualité	Épaisseur min ef (m)
QS1	P1	QS1	–
	P2	QS2	0.50
	P2	QS3	0.35
	P3	QS3	0.50
QS2	P2	QS2	–
	P3	QS3	0.35
QS3	P3	QS3	–

VII.2.2 Plate-forme proposée

Après étude des données disponibles et en prenant en compte la classification des sols de la zone (principalement QS2) ainsi que les recommandations de la norme UIC 719 R, il a été jugé nécessaire d'adopter une plate-forme de type P3, correspondant à une structure performante.

- **Justification** : Ce choix s'explique par la fréquence élevée du trafic ferroviaire lourd prévu sur cet axe, avec un tonnage journalier à transporter estimer à 142 850 tonnes. De plus, la charge à l'essieu, fixée à 32,5 tonnes, impose des exigences strictes en termes de portance et de stabilité.

Donc, il est nécessaire d'opter pour une plate-forme de type P3 afin d'assurer la sécurité du trafic, un bon confort de circulation et une infrastructure durable, que ce soit pour les voyageurs ou les marchandises.

VII.2.3 Couche de forme

Une épaisseur de 35 cm a été retenue pour la couche de forme, réalisée avec un matériau de qualité QS3, appliquée sur les zones où le sol en place est classé QS2.

- **Justification :** Cette solution a été retenue après les études de terrain, qui ont montré que les sols QS2, même s'ils sont de qualité moyenne, ne suffisent pas à garantir une bonne portance pour une plate-forme de type P3.

La mise en place d'une couche de forme a donc pour objectifs : d'améliorer la portance, d'assurer une bonne répartition des charges, de limiter les vibrations et de protéger la voie contre la remontée des particules fines.

VII.2.4 Calcul des épaisseurs minimales des couches d'assise

Conformément à la fiche UIC 719 R, l'épaisseur de la couche d'assise est déterminée à l'aide de la formule suivante : $e \geq E + a + b + c + d + f + g$

e : représente l'épaisseur totale de la couche du ballast et des sous-couches.

Les valeurs et critères associés à chacun des paramètres (E, a, b, c, d, f, g) sont détaillés en annexe, conformément aux prescriptions de la fiche UIC 719 R (voir Annexe F).

- Les tableaux suivants résument le dimensionnement et la composition de la couche d'assise selon la norme UIC 719 R :

Tableau VII.2 : Dimensionnement de la couche d'assise pour le cas étudié

Paramètres	Valeurs (m)	Critère de choix
E	0.45	Une plate-forme de classe de portance P3
a	0	Les groupes UIC 1 et 2
b	0.0425	Traverses en béton de longueur L = 2.415 m
c	0	Un dimensionnement normal
d	0.15	Tonnage de 325 kN (valeur élevée proposée par le maître d'ouvrage selon les normes AREMA)
f	0	Lignes parcourues à V ≤ 160 km/h et P3
g	0	Pas de géotextile pour sol QS3
e calculé	0.6425	–
e adopté	0.65	–

Tableau VII.3 : Epaisseurs de la structure de la voie

Couches	Ballast	Sous-ballast	Couche de fondation	Couche de forme (type QS3)
Épaisseur (m)	0.30	0.20	0.20	0.35

♣ **Remarque :** Le dimensionnement pour une charge élevée de 32,5 tonnes par essieu nécessite une adaptation des couches d'assise. Ainsi, une majoration de 5 cm de l'épaisseur de la sous-couche a été appliquée. En conséquence, l'épaisseur de la couche de fondation est fixée à 0,20 m, portant l'épaisseur totale à : e = 0,65 + 0,05 = 0,70 m**.**

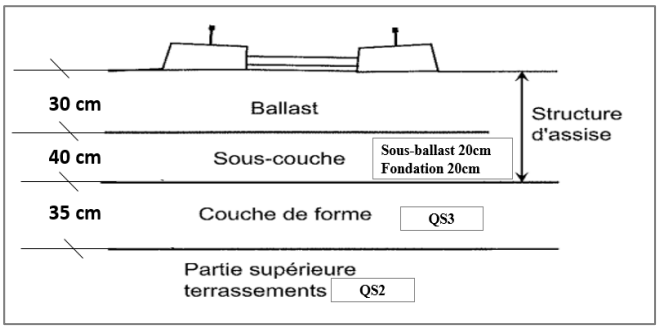


Figure VII.2 : Schéma des épaisseurs des couches d'assise du projet

VII.3 Conclusion

Cette étude nous a permis de comprendre l'importance de bien concevoir l'assise ferroviaire pour garantir la stabilité, la sécurité et la durabilité de la voie. En tenant compte du sol de qualité QS2, du trafic ferroviaire intense (jusqu'à 142 850 tonnes par jour) et d'une charge élevée à l'essieu (32,5 tonnes), il a été nécessaire de proposer une plate-forme de type P3, plus performante.

Pour cela, une couche de forme de 35 cm en matériau QS3 a été ajoutée pour améliorer la portance et répartir les charges. L'épaisseur totale de la couche d'assise a été portée à 0,70 m afin de répondre aux normes (UIC 719 R) et aux contraintes du terrain.

CHAPITRE VIII

Profil en Travers

VIII. Profil en travers

VIII.1 Introduction

Dans les projets ferroviaires, la réussite d'une ligne ne repose pas seulement sur la qualité des rails ou la puissance des locomotives. Elle commence bien plus tôt, dès la phase de conception géométrique du tracé. Parmi les outils essentiels à cette étape, le profil en travers joue un rôle fondamental.

Ce chapitre propose une exploration détaillée du profil en travers, en mettant l'accent sur ses fonctions, sa composition, ses dimensions normatives et les méthodes de représentation utilisées dans la pratique professionnelle.

VIII.2 Profil en travers ferroviaire

VIII.2.1 Définition

Le profil en travers d'une voie ferrée est une coupe verticale réalisée perpendiculairement à l'axe de la voie. Il constitue un outil fondamental en conception ferroviaire, car il permet de représenter de manière détaillée la composition géométrique et structurale de l'infrastructure ferroviaire à un point donné du tracé.

D'abord, il montre les couches du sol sur lesquelles repose la voie, comme le ballast, le sous-ballast, la couche de forme et le sol support.

Ensuite, il met en évidence les éléments de la voie elle-même, c'est-à-dire les rails, les traverses et les attaches.

On y voit aussi les zones situées sur les côtés de la voie : les accotements, les bermes, les fossés pour l'évacuation de l'eau, et les talus, qui peuvent être en remblai ou en déblai.

Enfin, ce profil montre également les limites du terrain réservé à la voie ainsi que les zones de sécurité nécessaires pour que les trains puissent passer sans danger, en respectant le gabarit ferroviaire.

VIII.2.2 Différents types de profils en travers

Lors de la conception géométrique d'une voie ferrée, on distingue principalement deux catégories de profils en travers, chacun correspondant à un usage spécifique selon la phase du projet : étude préliminaire, implantation sur le terrain ou suivi d'exécution.

VIII.2.2.1 Profil en travers type

Le profil en travers type est un dessin standard utilisé au début d'un projet ferroviaire pour représenter la forme théorique de la voie dans des conditions idéales. Il montre les dimensions de la plateforme, les pentes, ainsi que l'épaisseur des différentes couches telles que le ballast et le sous-ballast, en conformité avec les normes techniques en vigueur (UIC 719, SNTF). Il sert à planifier le projet, estimer les quantités de matériaux nécessaires, et vérifier la conformité géométrique du tracé.

Il constitue une référence sur papier qui guide la conception et le dimensionnement de l'ensemble de la plateforme ferroviaire.

VIII.2.2.2 Profil en travers courant

Le profil en travers courant est un relevé topographique réalisé à intervalles réguliers (tous les 10 à 25 mètres), à un point kilométrique donné. Il indique les altitudes du terrain naturel et celles du projet, ainsi que le dévers prévu de la plateforme. Utilisé principalement en phase de terrassement, il permet d'ajuster le tracé aux réalités du terrain et de calculer avec précision les volumes de déblais et remblais.

C'est un outil de terrain essentiel pour adapter le projet ferroviaire aux conditions géotechniques réelles rencontrées sur site.

VIII.2.3 Éléments du profil en travers

VIII.2.3.1 Couches d'infrastructure

- Sol support, base du sol parfois renforcée si elle est de mauvaise qualité.
- Couche de forme, améliore la portance du sol.
- Sous-ballast, couche stabilisatrice et filtrante entre la couche de forme et le ballast

VIII.2.3.2 Superstructure

- Ballast, assurant drainage.
- Traverses, maintiennent l'écartement des rails et posées perpendiculairement.
- Rails, sur lesquels roulent les trains
- Attaches, fixent les rails aux traverses
- L'écartement de la voie

VIII.2.3.3 Éléments latéraux et de drainage

- **Accotements** : bords inclinés situés de part et d'autre de la plateforme
- **Bermes** : zones planes intermédiaires sur les talus, servant notamment de support aux équipements (barrières de sécurité, signalisation, etc.)
- **Fossés** : aménagements en creux destinés à collecter et évacuer les eaux de ruissellement
- **Talus (remblai / déblai)** : pentes latérales permettant d'adapter la plateforme aux variations du terrain
- **Emprise** : surface du terrain naturel réservée à la voie ferrée, délimitée par les limites du domaine public ferroviaire

VIII.3 Profil en travers du projet étudié

Tableau VIII.1 : Éléments caractéristiques du profil en travers type du projet étudié

Catégorie	Élément	Spécification
Général	Type de ligne	Voie unique avec futur dédoublement à droite
	Forme	Asymétrique, une largeur de 4.70 m du côté droit et de 3.30 m du côté gauche, mesurées à partir de l'axe de la voie.

	Écartement de la voie	1435 mm
	Largeur de la plateforme	6.80 m
	Pente latérale de la plateforme	4 % vers l'extérieur
Superstructure	Type de rail	UIC 60 E1
	Type de traverses	Monoblocs VAX U-31
	Attaches	Attaches élastiques, NABLA
	Épaisseur ballast	30 cm
Sous-ballast	Épaisseur	20 cm
Couche de fondation	Épaisseur	20 cm
Couche de forme	Épaisseur	35 cm
Drainage / Terrassement	Pente de talus	1H/2V en remblai 1H/1V en déblai
	Pente latérale du ballast	3H/2V
	Fossé trapézoïdal – Largeur (B)	1.50 m
	Fossé trapézoïdal – Profondeur (h)	0.50 m
	Fossé trapézoïdal – Largeur base (b)	0.50 m

VIII.4 Calcul des cubatures

Le calcul des cubatures permet d'estimer les volumes de déblais et de remblais à déplacer dans un projet. On distingue deux types :

- Les volumes "debouts" pour les projets étendus.
- Les volumes "couchés" pour les projets linéaires.

Pour ces derniers, le calcul repose sur les profils en travers, les surfaces de terre à excaver ou remblayer, et les distances entre profils.

Deux méthodes sont utilisées :

La moyenne des aires, on calcule la surface moyenne entre deux profils, puis on la multiplie par la distance entre ces profils pour obtenir le volume intermédiaire

La méthode des prismoïdes, plus précise car elle prend en compte une surface intermédiaire entre profils.

♣ Le tableau VIII.2 présente les résultats obtenus à l'aide du logiciel Civil 3D.

Tableau VIII.2 : Cubatures de terrassement et les couches d'assises

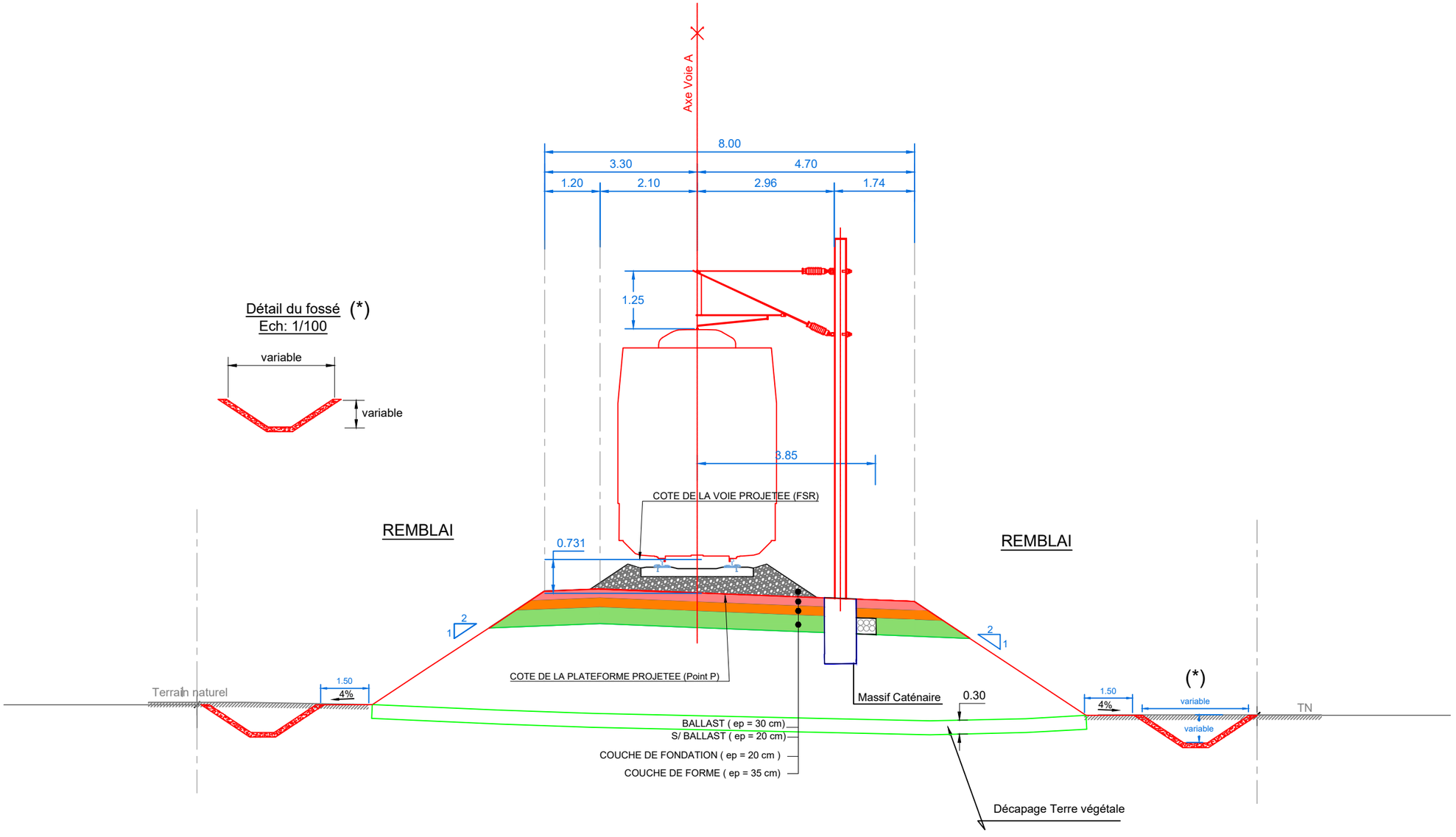
Nature	Volume (m^3)
Déblais	299674.37
Remblais	1009305.84
Ballast	37820.69
Sous ballast	27813.65
Couche de fondation	29728.56
Couche de forme	56632.72

NB : Les profils en travers types sont joints en annexe en format A3.

VIII.5 Conclusion

L'analyse du profil en travers a permis de mieux comprendre la structure de ce projet ferroviaire en voie unique à futur dédoublement. L'étude des éléments techniques de la plate-forme a facilité la lecture du tracé et son adaptation au terrain. Les volumes de déblais et remblais ont été calculés de manière précise grâce au logiciel Civil 3D, ce qui nous prépare efficacement à la phase de terrassement.

PROFIL EN TRAVERS TYPE
Remblai
Echelle : 1/100



Détail du fossé (*)
Ech: 1/100

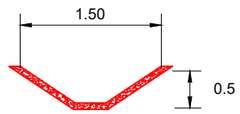
ENSTP
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Build and Ground works engineering

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

PROJET	Réalisé par	Encadré par	Département	Echelle	Année universitaire
Etude en APD de la nouvelle ligne minière Bechar-Tindouf- Gara Djebilet du PK 255+000 au PK 270+000 avec la conception d'une gare de croisement	Nassima KEDDANI	MrBOUDADI.M Mme.CHIALI.S	DIB	1:100	2024/2025

PROFIL EN TRAVERS TYPE
Déblai
Echelle : 1/100

Détail du fossé TYPE 1
Ech: 1/100



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

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

PROJET	Réalisé par	Encadré par	Département	Echelle	Année universitaire
Etude en APD de la nouvelle ligne minière Bechar-Tindouf- Gara Djebilet du PK 255+000 au PK 270+000 avec la conception d'une gare de croisement	Nassima KEDDANI	MrBOUDADI.M Mme.CHIALI.S	DIB	1:100	2024/2025

CHAPITRE IX

Terrassement et Ouvrages

IX. Terrassement et ouvrages

IX.1 Introduction

Dans les projets ferroviaires, les terrassements et ouvrages d'art sont essentiels dès le début du chantier. Les terrassements consistent à creuser, déplacer et modeler le sol à l'aide de matériaux naturels, afin de préparer le terrain à la pose des voies.

Les ouvrages d'art, tels que les ponts, tunnels ou murs de soutènement, permettent de franchir des obstacles naturels ou artificiels. Ils sont conçus pour résister aux contraintes spécifiques du trafic ferroviaire et nécessitent l'emploi de matériaux adaptés ainsi que l'intervention de spécialistes.

Ce chapitre a pour objectif de présenter ces deux catégories de travaux, leur rôle, les contraintes associées à leur mise en œuvre, ainsi que leur application dans le cadre de ce projet ferroviaire.

IX.2 Terrassement

Le terrassement regroupe l'ensemble des opérations nécessaires à la préparation du sol avant la réalisation d'un ouvrage. Ces opérations incluent les fouilles, l'extraction, le transport, le dépôt, le compactage et le réglage des matériaux en place ou rapportés.

L'objectif principal de ces travaux est de :

- Assurer une assise stable et homogène pour les fondations ou la superstructure ;
- Garantir la portance et la durabilité du sol support ;
- Prévenir les désordres géotechniques tels que les glissements de terrain, affaissements ou tassements différentiels
- Faciliter l'intégration des réseaux techniques (drainage, assainissement, gaines techniques, etc.)
- Respecter les profils en long et en travers définis par le projet.

IX.2.1 Remblai

C'une opération de terrassement qui consiste à rapporter de la terre ou d'autres matériaux pour surélever le sol, combler une cavité ou créer une plate-forme. Ce procédé est couramment utilisé pour ajuster le terrain aux besoins du projet, notamment en cas de dénivelé important.

Dans le cadre de l'étude du tracé, des sondages carottés ont été réalisés à l'aide d'appareils de forage, atteignant des profondeurs comprises entre 8 et 20 mètres. Ces sondages avaient pour objectifs de :

- Déterminer la nature (lithologie) des sols rencontrés
- Prélever des échantillons intacts ou remaniés pour des essais en laboratoire
- Mesurer la profondeur de la nappe phréatique si elle était interceptée
- Évaluer la stabilité des remblais en place.

L'analyse du profil en long a permis de localiser des zones de remblai, dont certaines dépassent 8 mètres de hauteur

♣ Le tableau XI.1 présente les emplacements et les principales caractéristiques :

Tableau IX.1 : Zones en remblai

Remblai	Localisation	Hmax (m)	Pente
1	257+600	9.41	1H/2V
2	259+350	10.06	1H/2V
3	265+825	6.45	1H/2V
4	269+525	9.75	1H/2V

Selon le référentiel technique de la SNTF (chapitre 07.2.2 « Ouvrages en terre »), les pentes de talus les plus couramment utilisées sont exprimées en rapport base/hauteur (V/H).

- **Pour les remblais** : les pentes les plus fréquentes sont 3/2, 2/1 et 2/3.

IX.2.2 Déblai

C'est une opération de terrassement consistant à retirer des matériaux du sol afin de rabaisser le terrain, niveler une zone ou créer une cavité. Les matériaux extraits peuvent être réutilisés sur le chantier pour des remblais ou évacués s'ils sont impropres à la réutilisation. Cette action permet également de se procurer des sols à des fins de remblaiement ailleurs sur le tracé.

Comme pour les zones de remblai, des sondages carottés ont été réalisés dans le cadre de l'étude afin d'évaluer les conditions géotechniques du terrain. Ces investigations ont également permis d'identifier les zones concernées par les déblais le long du tracé. Le tableau XI.2 présente les emplacements de ces zones ainsi que leurs principales caractéristiques :

Tableau IX.2 : Zones en Déblai

Déblai	Localisation	Hmax (m)	Pente
1	257+350	12.48	1H/1V

Selon le référentiel technique de la SNTF (chapitre 07.2.2 « Ouvrages en terre »), les pentes de talus les plus couramment utilisées sont exprimées en rapport (H/V).

- **Pour les déblais** : les pentes varient entre 1/1 ,1/2 et 3/1 selon la nature du terrain.

IX.2.3 Stabilité des talus

La stabilité des talus en remblai et en déblai a été analysée à l'aide du logiciel GEO5, en appliquant la méthode de Bishop basée sur la division du sol en tranches verticales. L'objectif est de déterminer la surface de glissement critique et de vérifier que le facteur de sécurité (Fs) respecte les seuils requis :

- **Stabilité à long terme (LT)** : $Fs \geq 1.5$
- **Stabilité à court terme (CT)** : $Fs \geq 1.3$
- **Cas sismique (S)** : $Fs \geq 1.0$

Les calculs intègrent les paramètres géotechniques tels que le poids volumique (γ) du sol, la cohésion (c) et l'angle de frottement interne (φ), tout en prenant en compte les effets sismiques définis par le

RPA 99 / Version 2003 (Stabilité des pentes). Le logiciel optimise automatiquement la recherche de la surface de glissement critique en analysant plusieurs configurations possibles.

♣ **Vérification de la stabilité du projet étudié**

Tableau IX.3 : Caractéristique de couches

Caractéristique des matériaux	Partie supérieure du Remblai	Remblai	Sable fin Caillouteux	Encroutement Gréseux	Grès calcaire dur	Grès très altéré
γ (KN/m3)	20	20	18	20	26	24
C(°)	30	30	30	30	22	30
Φ (Kpa)	10	05	02	25	45	39
Sol						
Surcharge (Kpa)	60 Kpa					

- **Cas remblai au PK 259+350 :**

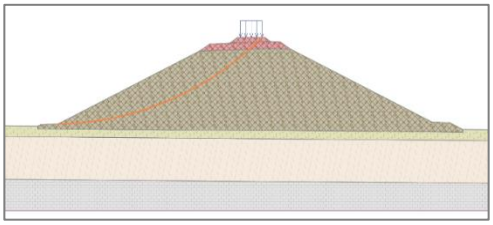


Figure IX.2: Stabilisation d'un remblai (statique)

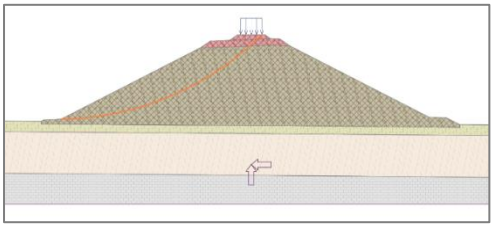


Figure IX.1: Stabilisation d'un remblai (s)

- **Cas déblai au PK 257+350:**

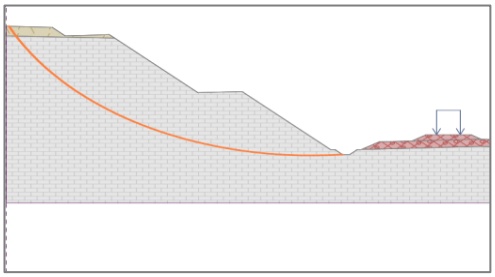


Figure IX.4: Stabilisation d'un déblai (statique)

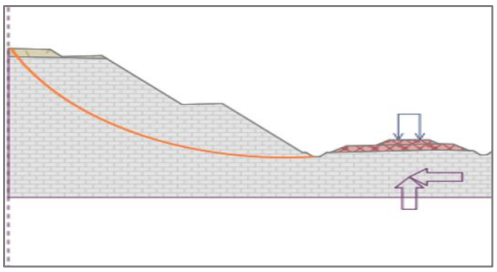


Figure IX.3 : Stabilisation d'un déblai (sismique)

♣ Le tableau XI.4 donne la vérification des pentes :

Tableau IX.4 : Récapitulatif des pentes utilisées en remblai et en déblai

Cas étudié		Fs	Seuil	Pente	Interprétation
Déblai PK 259+350	statique	1.82	> 1,50	1H/1V	-Les résultats montrent que la stabilité des pentes est admissible dans tous les cas étudiés -Les coefficients de sécurité sont tous supérieurs aux valeurs minimales requises, même dans le cas sismique le plus défavorable. -Le sol présente une bonne résistance, de type rocheux
	sismique	1.63	> 1,00		
Remblai PK 259+350	statique	1.56	> 1,50	1H/2V	
	sismique	1.29	> 1,00		

IX.3 Contraintes Techniques

Avant le démarrage d'un chantier, il est indispensable de réaliser une inspection préalable du site. Cette étape vise à repérer la présence de voiries et réseaux divers (VRD), qui peuvent constituer des contraintes techniques à prendre en compte. Selon les cas, ces éléments devront être contournés, déplacés ou protégés afin d'assurer le bon déroulement des travaux. Parmi les réseaux les plus fréquemment rencontrés, on trouve :

- Lignes électriques
- Conduites de gaz
- Câbles de fibre optique
- Réseau téléphonique
- Réseau d'éclairage public
- Réseau de télévision par câble
- Réseau de chauffage.

IX.4 Ouvrage d'art

Un ouvrage d'art de franchissement est une structure construite pour assurer la continuité d'une voie de communication en surmontant un obstacle naturel ou artificiel. Son rôle est essentiel pour permettre le passage d'infrastructures. On distingue plusieurs types d'ouvrages d'art selon leur fonction et leur emplacement :

- **Les ponts et viaducs**, qui permettent de franchir des obstacles naturels ou d'autres voies.
- **Les passerelles**, réservées aux piétons ou aux conduites techniques.
- **Les tunnels**, assurant la continuité d'une voie à travers un obstacle naturel.
- **Les passages souterrains**, aménagés sous les voies ferrées pour les piétons.
- **Les murs de soutènement**, destinés à retenir les terres ou à stabiliser la voie.
- **Les petits ouvrages hydrauliques**, de moins de 2 mètres d'ouverture, servant à l'écoulement des eaux.

IX.5 Application au projet étudié

Le tronçon étudié traverse une zone désertique, ce qui réduit les contraintes d'aménagement. Il ne nécessite que la pose de buses pour le drainage, sans ouvrages d'art importants. Cela facilite les travaux et limite les difficultés techniques sur ce secteur.

Le tableau XI.5 regroupe l'ensemble des contraintes qui croisent le tracé du projet sur une distance de 15 km, allant du PK 255+000 au PK 270+000 :

Tableau IX.5: Contraintes traversées par le tracé

Contrainte	Localisation (PK)		Mesure prévue
	Du	**Au**	
Fibre Optique	256+777	256+876	Le déplacement est possible
	257+416	257+550	
	258+856	259+014	
	262+939	263+058	
	263+201	263+383	
	267+428	267+852	

-

IX.6 Conclusion

Les travaux de terrassement dans ce projet ont été adaptés aux conditions du sol grâce à des études géotechniques précises. Cela a permis d'assurer la stabilité des remblais et des déblais, ainsi qu'une bonne tenue de la plate-forme ferroviaire.

Le tracé passant par une région désertique, il n'a pas nécessité de grands ouvrages d'art. Seules des buses ont été prévues pour le drainage. Cette situation rend les travaux plus simples à réaliser, avec moins de contraintes techniques et des coûts réduits.

CHAPITRE X

Conception de la gare

X. Conception de la gare

X.1 Introduction

Depuis près de deux siècles, les gares ont évolué en même temps que les modes de transport. Elles ne sont plus de simples points d'arrêt pour les trains, mais de véritables pôles d'échanges, animés par une grande diversité de voyageurs. Leur rôle dépasse aujourd'hui la fonction ferroviaire : elles participent pleinement à la dynamique urbaine, en intégrant des dimensions sociales, écologiques et culturelles dans leur conception.

Élément stratégique du réseau, la gare assure la gestion des flux de passagers et de marchandises, tout en garantissant la sécurité et la fluidité du trafic. Elle s'appuie pour cela sur des infrastructures adaptées et des équipes spécialisées. Certaines, comme les gares maritimes, sont spécifiquement conçues pour accueillir les liaisons avec le transport par voie d'eau.

Dans ce chapitre, nous analyserons les principes fondamentaux de conception d'une gare, en vue de les appliquer à notre projet de manière fonctionnelle et sécurisée.

X.2 Différents types de gares

Il existe différents types de gares, chacun répondant à des besoins spécifiques du réseau ferroviaire. On distingue notamment :

- Gares de voyageurs, destinées à l'embarquement et au débarquement des passagers
- Gares de marchandises, qui permettent le chargement et le déchargement des produits
- Gares mixtes, combinant les deux fonctions
- Gares de croisement, essentielles pour optimiser la circulation des trains sur une même ligne.

Dans notre projet, des points de croisement et de garage (PCG) sont prévus afin de permettre aux trains de se croiser ou de stationner temporairement. Ces aménagements, indispensables pour assurer une circulation fluide et régulière, seront analysés en détail dans le cadre de notre étude.

X.1 Étude du plan de masse et choix optimal du site d'une gare Ferroviaire

La conception d'un plan de masse constitue une étape essentielle dans le projet de construction d'une gare. Celui-ci doit regrouper l'ensemble des installations nécessaires à son bon fonctionnement, en tenant compte de plusieurs éléments techniques majeurs :

Tout d'abord, la catégorie des voies détermine la fonction assignée à chaque voie ainsi que les équipements qui y seront associés. Ensuite, le trafic ferroviaire influe directement sur la dimensionnement et l'organisation des espaces, en fonction des flux attendus. L'emplacement de la gare joue également un rôle essentiel, car il conditionne sa configuration générale en tenant compte du relief, de l'accessibilité et des besoins de desserte locale ou régionale. Enfin, le plan de masse doit intégrer dès sa conception les

contraintes du site ainsi que les possibilités d'évolution future de l'infrastructure afin de garantir sa durabilité et son adaptabilité.

Après la conception du plan de masse, le choix du terrain destiné à accueillir la gare constitue une étape déterminante. Le site retenu doit présenter un sol stable, plat et bien drainé, avec une pente légère facilitant l'arrivée et le départ des trains. Une bonne accessibilité routière et une connexion efficace aux autres modes de transport sont également essentielles pour garantir une intermodalité optimale. Par ailleurs, une coordination étroite avec les autorités locales est indispensable afin d'intégrer le projet dans son environnement urbain, de prendre en compte les impacts sur les riverains, et d'anticiper les besoins futurs en matière de mobilité.

X.2 Point de Croisement et Garage

X.2.1 Définitions

Les points de changement de voie ou PCG (Selon IN3278, Édition 2006) sont des dispositifs ferroviaires permettant de transférer la circulation d'un train d'une voie à une autre, notamment en cas de nécessité opérationnelle ou de perturbation du trafic. On distingue principalement deux types d'installations :

- Le PCV simple : il permet le basculement des circulations d'une voie vers une autre, sans offrir la possibilité de stationnement prolongé.
- Le PCVE (Point de Changement de Voie avec Évitement) : il comprend, en plus du changement de voie, une voie d'évitement permettant le garage temporaire d'un train, notamment en cas d'avarie ou pour des besoins de régulation.

X.2.2 Caractéristiques techniques des PCG

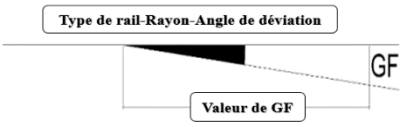
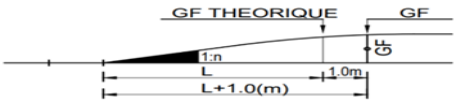
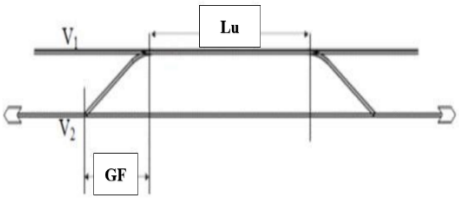
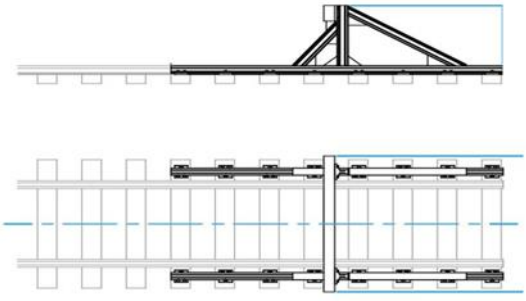
Les voies d'évitement associées aux PCVE doivent répondre aux critères techniques suivants :

- Voie électrifiée, pour permettre le stationnement de trains à traction électrique.
- Longueur utile minimale de : 20 m pour accueillir du matériel interopérable ;500 m sur les extensions du réseau Atlantique.
- Présence d'une impasse de sécurité, protégeant l'itinéraire principal.
- Déclivité maximale autorisée : 2 mm/m.
- Entraxe maximal entre la voie d'évitement et la voie principale adjacente : 7.50 m.

Ces installations doivent également respecter les dispositions techniques prévues notamment en ce qui concerne l'armement en Longs Rails Soudés (LRS) et les dispositifs de sécurité liés aux voies de garage.

X.2.3 Étude des caractéristiques et conditions de conception d'une gare de croisement ferroviaire

Tableau X.1 : Conditions générales de conception d'une gare de croisement

Caractéristique	Définition	Normes applicables
Déclivité	Pente admise dans la zone de croisement. En gare, la déclivité doit être limitée en fonction des activités prévues	En général, on adopte déclivité longitudinale nulle (0,00 ‰) afin de prévenir tout déplacement involontaire des trains à l'arrêt.
Appareils de voie	Dispositifs assurant la continuité d'un itinéraire choisi parmi plusieurs options (branchements ou traversées).	UIC60 – 1/12 – 500 m  **Figure X.1: Schéma de garage franc**
Garage franc	Le garage franc est la portion de voie située après un aiguillage, réservée au stationnement des trains, sans gêner la circulation sur les autres voies ni empiéter sur les installations de l'appareil de voie.	**GF = 3,57 × N + 1 (m)**, N = 1 / tan(α), N variable selon le type de l'appareil de voie  **Figure X.2 : Schéma de garage franc**
Longueur utile	Longueur de voie permettant de garer un train complet sans gêner le trafic sur les voies principales ou adjacentes.	**LU = Longueur du train + Distance de glissement + marge de sécurité**  **Figure X.3 : Schéma de longueur utile**
Heurtoirs	Les heurtoirs sont des dispositifs placés en fin de voie pour stopper les trains et éviter les dépassements accidentels. Ils peuvent être fixes ou patinants, ces derniers absorbant mieux les chocs. Un patin de freinage, installé 10 mètres en amont, renforce leur efficacité.	Utilisés en dépôt, terminus, voies de service  **Figure X.4: Schéma d'heurtoir**

X.3 Application au projet étudié

La gare de croisement est implantée entre les points kilométriques PK 259+293 et PK 261+822, ce qui correspond à une longueur totale de 2 529 mètres. Elle est conçue pour répondre aux besoins d'exploitation d'un trafic marchandises, en assurant les fonctions de croisement, d'évitement, et de garage sécurisé.

Cette installation assure une triple fonctionnalité :

- **Croisement** : permet à deux trains circulant en sens opposé de se croiser en toute sécurité.
- **Évitement** : permet à un train plus rapide de dépasser un train plus lent ou à l'arrêt.

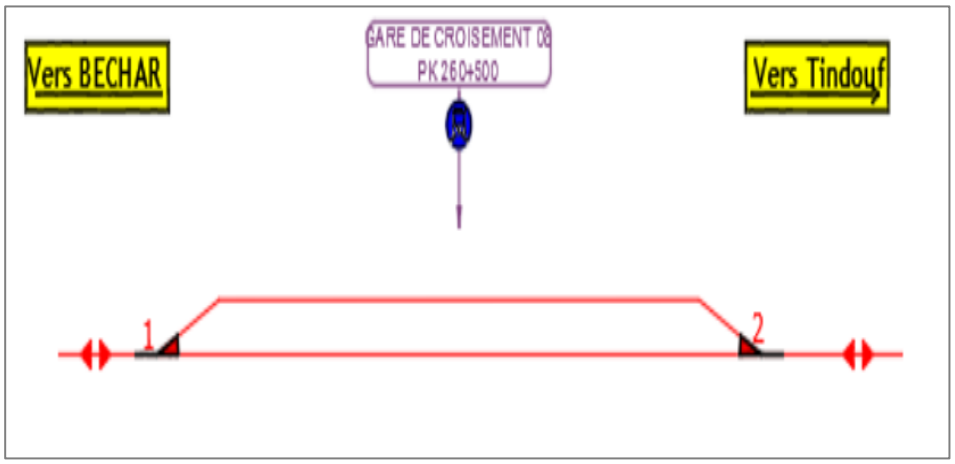


Figure X.5: Schéma de PCG du projet étudié

Tableau X.2 : Caractéristiques de PCG étudie

Élément	Détail
Nombre et type de voies	Deux , Une principale pour la circulation directe, Une voie d'évitement pour les croisements à vitesse réduite
Vitesses autorisées	-160 km/h sur la voie principale - 70 km/h sur la voie d'évitement
Entre-axes des voies	4.2 m
Pente	0 ‰ (pente nulle)
Type d'appareil de voie	UIC60 –500 m –1/12
Longueur utile totale des voies	2 400 m

X.4 Assainissement longitudinal de la gare

L'assainissement en gare ferroviaire est indispensable pour évacuer les eaux pluviales et protéger la plateforme, le ballast et les installations contre l'humidité excessive. Il repose sur trois dispositifs principaux :

- L'assainissement transversal dirige l'eau des quais vers les voies grâce à une pente de 2 %, facilitant un écoulement rapide et limitant l'accumulation d'eau en surface.
- L'assainissement longitudinal utilise des drains placés parallèlement aux voies, avec une pente de 4 %, pour capter les eaux de ruissellement qui s'infiltrent dans le ballast et les acheminer vers le réseau d'évacuation via des regards de visite.

Le drainage de la plateforme repose sur des conduites en PVC perforé (300 mm de diamètre), installées entre les voies dans une tranchée drainante remplie de matériaux filtrants et protégées par du géotextile. Des regards espacés tous les 50 m permettent le contrôle et l'entretien du système. Les eaux sont ensuite collectées par des caniveaux ou collecteurs en béton.

X.5 Conclusion

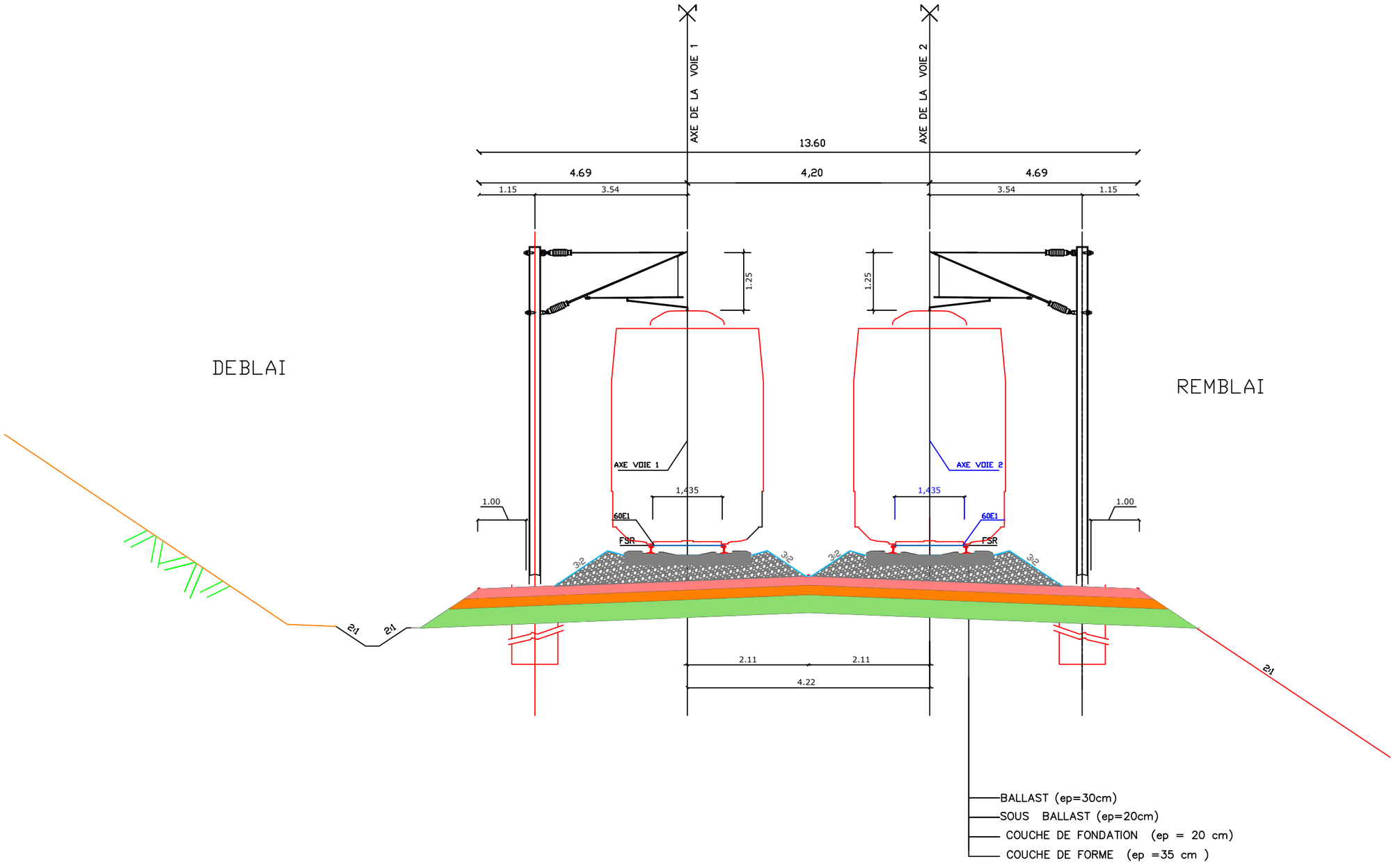
La conception de la gare de croisement s'inscrit dans une démarche conforme aux standards techniques en vigueur, en tenant compte des exigences d'exploitation, de sécurité et de régularité du trafic.

Elle permet une gestion efficace des circulations ferroviaires, notamment les opérations de croisement, d'évitement et de garage. Cette configuration assure la compatibilité de l'infrastructure avec les besoins actuels du réseau et ses évolutions futures.

PROFIL EN TRAVERS TYPE
Gare de croisement au PK 260+500
Echelle : 1/100

DEBLAI

REMBLAI



ENSTP
المدرسة الوطنيـــة العليـــا للأشـــغال العموميـــة
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Build and Ground works engineering

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

PROJET	Réalisé par	Encadré par	Département	Echelle	Année universitaire
Etude en APD de la nouvelle ligne minière Bechar-Tindouf- Gara Djebilet du PK 255+000 au PK 270+000 avec la conception d'une gare de croisement	Nassima KEDDANI	MrBOUDADI.M Mme.CHIALI.S	DIB	1:100	2024/2025

CHAPITRE XI

Étude d'impact sur l'environnement

XI. Étude d'impact sur l'environnement

XI.1 Introduction

Pour un acteur clé du secteur ferroviaire, promouvoir le train ne suffit plus : il est également essentiel de réduire l'impact environnemental de ses activités, de la conception à l'exploitation. Bien que le rail soit un mode de transport écologique, la construction de nouvelles lignes peut entraîner des effets négatifs sur les écosystèmes, les paysages et les ressources naturelles.

Dans ce contexte, l'étude d'impact environnemental devient un outil essentiel. Elle permet d'anticiper et de réduire les effets négatifs d'un projet, tout en cherchant à concilier performance et respect de l'environnement.

En Algérie, cette démarche s'inscrit dans une stratégie nationale de transition écologique, soutenue par des lois et des réglementations visant à moderniser les transports tout en protégeant l'environnement. Ce chapitre abordera ainsi les objectifs de l'étude d'impact environnemental de notre projet, qui consistent à :

- Prendre en compte les caractéristiques du milieu naturel, humain et paysager dès la conception du projet.
- Identifier et évaluer les impacts potentiels du projet sur l'environnement.
- Proposer des mesures visant à réduire, compenser ou atténuer ces impacts, tout en assurant une intégration harmonieuse du projet dans son environnement.

XI.2 Présentation initiale de la zone d'étude

XI.2.1 Environnement physique

Tableau XI.1 : Ressources physiques de la zone d'étude

Type	Description
1. Relief	Le tracé traverse différents types de reliefs sahariens : • Régions de regs et hamadas aux terrains plats à légèrement ondulés •Zone d'erg actif avec dunes mobiles pouvant atteindre 10 m de haut
2. Climat	• Climat saharien hyper-aride • Températures : moyennes mensuelles estivales dépassant 40°C (jusqu'à 47°C), hivernales pouvant descendre à 3°C ; • Précipitations : annuelles inférieures à 100 mm, irrégulières et concentrées entre novembre et février ; • Vents : fréquents, secs, dominants du nord-est.
4. Topographie	• Relief globalement faible en amplitude, avec altitudes comprises entre 450 et 700 m • Topographie favorable à la construction d'infrastructures linéaires. • Présence de talwegs (fossés secs) susceptibles de se remplir lors de crues exceptionnelles.

5. Hydrologie	• Oueds temporaires, secs la majeure partie de l'année, en activité seulement lors de crues soudaines • Zones de sebkhates (dépressions salées) à drainage très lent ou nul • Nappes souterraines profondes, exploitées localement pour l'agriculture oasienne (exemple à Tabelbala).
6. Sismicité	• Le tracé est localisé en zone de sismicité très faible à nulle (Zone 0 selon la classification nationale) ; • Risque tectonique négligeable, ce qui favorise la stabilité à long terme des ouvrages ferroviaires.

XI.2.2 Environnement biologique

XI.2.2.1 Faune

Malgré le milieu désertique, la zone abrite une faune assez variée : des petits mammifères comme le fennec, le renard roux ou la gerbille, ainsi que plusieurs espèces de reptiles comme les lézards, les caméléons et les varans du désert. On y trouve aussi des oiseaux, dont certains sont protégés. Beaucoup de ces espèces vivent dans un environnement fragile, et si le projet modifie trop leur habitat, cela pourrait les mettre en danger.

XI.2.2.2 Flore

La végétation dans la zone est assez clairsemée à cause du climat très sec. On y trouve principalement des plantes résistantes à la sécheresse, comme le tamaris, l'acacia raddiana ou encore la salsola. Elles poussent surtout le long des oueds, là où l'eau est plus accessible, et jouent un rôle important dans l'équilibre de l'écosystème.

XI.2.3 Environnement humain

Tableau XI.2 : Ressources humaines de la zone d'étude

Type	Description
1. Population	•Faible densité : moins de 2 habitants/km² •Communes concernées : Erg Ferradj, Mechraa Houari Boumediene, Tabelbala •Population concentrée autour des zones irriguées (oasis) et infrastructures (routes, puits)
2.Habitat	• Habitat groupé traditionnel, organisé autour des oasis •Utilisation de matériaux locaux : adobe, pierres •Présence notable de ksour, structures fortifiées historiques typiques du sud-ouest algérien.
3.Agriculture	•Secteur agricole limité aux zones oasiennes fertiles, notamment à Tabelbala •Culture du palmier dattier (produit de base) •Irrigation assurée par foggaras (galeries souterraines) ou motopompes (pompes mécaniques)

4.Industrie	•Zone non industrialisée •Absence de grandes usines ou zones industrielles •Opportunité de développement avec le projet ferroviaire (transport de matières premières, logistique)
5.Tourisme et Artisanat	•Tourisme très faible actuellement •Artisanat local : tissage, poterie, objets en cuir ou en bois
6.Réseau d'énergie	• Électricité disponible surtout dans les centres habités • Présence de panneaux solaires dans quelques zones rurales
7.Grandes infrastructures	•Routes goudronnées rares, souvent remplacées par des pistes sablonneuses •Réseau d'eau potable, électricité et télécoms encore peu développé •La nouvelle ligne ferroviaire facilitera le transport, l'approvisionnement et l'ouverture de la région

XI.3 Identification et description des impacts

XI.3.1 Impacts positifs du projet

- Création d'un axe de transport stratégique facilitant l'acheminement du minerai de fer extrait à Gara Djebilet vers les installations portuaires, tout en réduisant les délais logistiques et les coûts d'exportation.
- Création d'environ 3000 emplois durant la phase de construction, dont 1000 postes permanents liés à la maintenance, la conduite, la logistique et la sécurité ferroviaire.
- Réduction des gaz à effet de serre grâce au recours au transport ferroviaire, limitant les émissions de CO_2, NOx et particules fines.
- Dynamisation économique et touristique à travers l'attraction d'investissements et le développement de l'artisanat local et des infrastructures d'accueil.
- Renforcement des compétences locales grâce à des formations permettant l'intégration des habitants dans le projet et l'amélioration de leur employabilité.

XI.3.2 Impacts négatifs du projet

- Les travaux vont produire de la poussière et des gaz qui peuvent être dangereux pour la santé des habitants et des ouvriers.
- Le bruit des engins et les vibrations associées perturberont la tranquillité des zones habitées et de la faune locale.
- Le tracé risque de compacter les sols, modifier les oueds saisonniers et causer des inondations ou un déséquilibre hydrique

- Le projet entraînera la destruction d'habitats naturels et perturbera des espèces protégées comme la gazelle dorcas et le fennec.
- Les infrastructures vont modifier le paysage désertique et fragmenter le territoire jusque-là intact.
- La poussière et le bruit répétés peuvent causer des problèmes respiratoires, auditifs ou du stress chez les habitants.
- La ligne ferroviaire pourrait entraîner l'expropriation de terres, ce qui risque de créer des tensions avec les habitants.
- Des sites anciens ou historiques pourraient être détruits s'ils ne sont pas identifiés à l'avance.

XI.4 Mesures prises pour minimiser les impacts environnementaux du projet

Des mesures ont été mises en place pour réduire les impacts environnementaux du projet, en protégeant les ressources naturelles et en respectant la réglementation en vigueur.

Tableau XI.3 : Principaux impacts environnementaux et mesures proposées

Domaine d'impact	Impacts identifiés	Mesures de mitigation proposées
Qualité de l'air	Pollution de l'air par la poussière et les gaz des engins de chantier	• Arrosage fréquent des pistes • Bâchage des camions transportant des matériaux • Limitation de vitesse sur les voies de chantier • installation de filtres sur les engins.
Eaux superficielles et souterraines	Risque de pollution des oueds et des nappes par les hydrocarbures du chantier	• Création de bassins de rétention, systèmes de drainage adaptés • Protection des berges • Interdiction de rejets directs dans les oueds • Contrôle des fuites d'hydrocarbures.
Flore	Dégradation de la végétation et déséquilibre des écosystèmes locaux	• Baliser les zones de travaux pour éviter les zones sensibles • Minimiser les défrichements • lancer un programme de replantation post-chantier avec des espèces locales.
Faune	Perturbation de la faune et fragmentation des habitats par le chantier	• Création de passages fauniques • Végétalisation des talus • Éclairage minimal • Balisage des caténaires • Surveillance écologique et sensibiliser les équipes au respect des espèces protégées.

Habitants	Impacts sur la santé et le cadre de vie des populations riveraines.	• Installer des écrans antibruit • Informer et sensibiliser les habitants • Assurer un suivi médical des ouvriers, • fournir des équipements de protection individuelle (EPI).

XI.5 Risques majeurs

Le tronçon compris entre les PK 255+000 et PK 270+000 se caractérise par un relief globalement plat, ce qui facilite les travaux de terrassement. Cependant, certaines irrégularités du terrain nécessitent des apports importants en remblais pour garantir la stabilité de la voie. Cela a un impact direct sur la gestion des matériaux et sur le coût du chantier. D'un point de vue environnemental, ce tronçon est exposé à un risque d'ensablement.

Par ailleurs, cette portion du tracé ne croise ni oueds importants, ni zones agricoles, forestières ou urbanisées. La végétation est de type désertique, peu dense mais sensible sur le plan écologique, ce qui nécessite de limiter l'emprise au sol et de compenser les impacts éventuels.

En outre, le tronçon n'interfère avec aucune infrastructure critique comme des conduites d'eau potable ou des gazoducs, ce qui simplifie les travaux.

En résumé, cette section offre des conditions favorables à la réalisation du projet, à condition de bien gérer l'ensablement et les besoins en remblais.

♣ **Remarque :**

Notre projet étudie est déjà reconnu comme exposé au risque d'ensablement. Toutefois, il est important de noter que la section située entre les PK 245+600 et PK 249+000, à proximité de l'Erg Er Raoui, présente un risque élevé en raison de la présence de dunes et de la force des vents dominants dans la région.

Par ailleurs, même si la zone fortement affectée par l'ensablement, comprise entre les PK 273+500 et PK 275+700, ne fait pas partie directement du tracé étudié, sa proximité représente une menace potentielle. Le sable transporté par le vent peut, à long terme, s'accumuler sur la voie ferrée, ce qui risque d'entraver la circulation des trains, d'endommager l'infrastructure et d'entraîner une dégradation des sols.

C'est pourquoi il est recommandé de mettre en place une surveillance régulière, ainsi que des mesures de protection (comme des brise-vent ou barrières anti-sable), afin de prévenir les impacts de l'ensablement et de garantir le bon fonctionnement de la ligne ferroviaire.

XI.6 Conclusion

Grâce à l'étude d'impact environnemental, on constate que ce projet est important pour le développement de la région, notamment en matière de transport, d'emploi et de croissance économique. Toutefois, la zone concernée est fragile sur le plan environnemental, ce qui impose une grande vigilance. Si les mesures de protection ne sont pas correctement appliquées, cela pourrait entraîner des conséquences graves, comme la disparition d'espèces animales ou des répercussions négatives sur les habitants.

En résumé, la réussite du projet ne dépend pas seulement de sa faisabilité technique, mais surtout de la manière dont il sera mis en œuvre, dans le respect des équilibres écologiques et sociaux. Il s'agit d'un projet utile, mais à haute sensibilité environnementale.

CHAPITRE XII

Signalisation ferroviaire

XII. Signalisation ferroviaire

XII.1 Introduction

Avec le développement du transport ferroviaire, la sécurité des circulations est rapidement devenue une priorité. Dès que plusieurs trains circulent sur un même réseau, il devient impossible de se fier uniquement à la conduite à vue, comme c'est souvent le cas en automobile.

Les longues distances de freinage, les vitesses élevées et la visibilité parfois réduite rendent indispensable la mise en place d'un système de signalisation capable de fournir aux conducteurs des informations fiables sur l'état de la voie.

Les installations de signalisation ont pour rôle de résoudre plusieurs problèmes essentiels liés à la sécurité et à la gestion du trafic ferroviaire. Elles permettent notamment de :

- Maintenir une distance suffisante entre les trains pour éviter les rattrapages (système de cantonnement ou block).
- Protéger les trains dans les zones de croisement ou de convergence (comme les cisaillements).
- Organiser la circulation dans les deux sens sur une même voie et éviter les collisions frontales.
- Prévenir les déraillements liés à une vitesse excessive.
- Sécuriser les passages à niveau, là où les routes croisent les voies ferrées au même niveau.

XII.2 Types de signalisation

Sur les lignes à double voie, les trains circulent généralement à gauche. Par conséquent, les signaux sont en principe placés à gauche de la voie concernée, ou au-dessus dans sa partie gauche. Dans les zones où l'espace entre les voies est réduit, on peut utiliser des signaux de type bas, placés au niveau du sol.

La signalisation ferroviaire peut être de deux types :

XII.2.1 Feux lumineux

Ils sont composés de feux de couleur installés sur des panneaux noirs à bordure blanche, généralement de forme oblongue ou circulaire. On distingue cinq couleurs principales, chacune ayant une signification spécifique :

- Rouge et violet : arrêt obligatoire ou marche très lente ;
- Jaune : ralentissement ;
- Vert et blanc : voie libre, le train peut avancer.

XII.2.1.1 Signaux mécaniques

Ils se présentent sous forme de panneaux (disque, carré, losange...), pouvant être mobiles grâce à un mécanisme de rotation, ou fixes. Ils sont placés :

- Perpendiculairement à la voie pour indiquer un ordre au conducteur
- Parallèlement à la voie quand aucun ordre n'est donné (signal effacé).

♣ **Remarque :** La signalisation lumineuse présente des avantages clairs par rapport à la mécanique. Elle offre une meilleure visibilité et une fiabilité accrue. C'est pourquoi la signalisation mécanique, en voie de disparition, n'est plus développée dans les systèmes modernes.

XII.3 Principe de base de cantonnement (systèmes d'espacement des trains)

Pour garantir la sécurité des circulations, les lignes ferroviaires sont divisées en sections appelées cantons, qui ne peuvent être occupées que par un seul train à la fois. L'entrée de chaque canton est protégée par un signal qui reste fermé tant que le canton est occupé.

Ce principe d'espacement permet de :

- Éviter les collisions entre trains (nez à nez) ;
- Assurer l'espacement des circulations pour éviter les rattrapages des trains ;
- Augmenter la fréquence de circulations des trains en toutes sécurités.

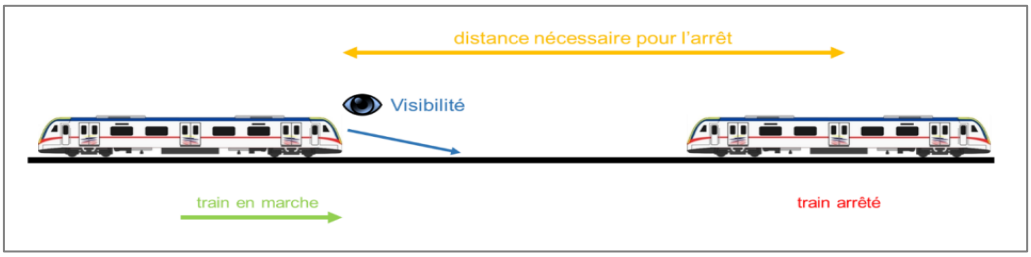


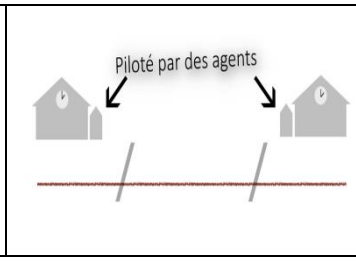
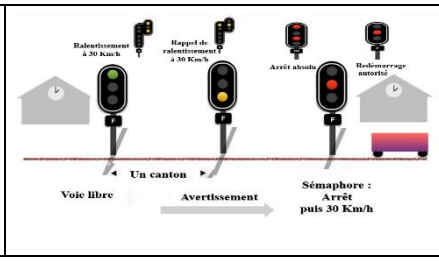
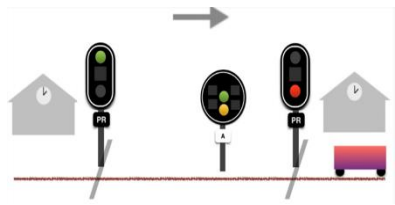
Figure XII.1: Principe de sécurité du cantonnement ferroviaire

Pour assurer la gestion de ces cantons, on utilise un système de régulation appelé block, qui a évolué au fil du temps. Aujourd'hui, on distingue trois types de blocks, classés selon leur ordre d'apparition :

- Block Manuel (BM)
- Block Automatique Lumineux (BAL)
- Block Automatique à Permissivité Restreinte (BAPR)

Tableau XII.1: Systèmes de cantonnement ferroviaire (BAL, BAPR, BM)

Spécifications	Bloc Manuel	Block Automatique Lumineux	Bloc Automatique à Permissivité Restreinte
Ligne concernée	Lignes à très faible trafic	Lignes à fort trafic	Lignes à trafic modéré ou faible
Principe de fonctionnement	- Piloté par des agents humains - Postes répartis sur la ligne - Cantonnement téléphonique parfois assisté par informatique	- Cantonnement automatique entre gares - Cantons de 1 à 2 km - Évite les rattrapages	- Similaire au BAL, mais cantons de jusqu'à 25 km - Moins de signaux
Type de signalisation	- Feux : vert, rouge - Aucun automatisme - Surveillance manuelle	- Feux : vert, jaune, rouge - Carré : arrêt absolu - Feux jaunes pour ralentissements	- Feux : vert, rouge - Signal avancé 1 km
Règles spécifiques	- Nécessite une présence humaine permanente - Adapté uniquement aux lignes à circulation très faible	- Le feu jaune peut être combiné à un rappel de ralentissement - Feux clignotants = effet immédiat à l'aiguillage	- Feu rouge non franchissable - Signalisation simplifiée en raison de la longueur des cantons
Avantages et limites	Très économique , Peu performant, requiert du personnel et réduit la capacité d'exploitation	Très sûr et automatisé, Coût élevé en installation	Moins coûteux que le BAL et moins flexible si un train s'arrête en plein canton

Schéma illustratif			

XII.4 Compteur d'Essieux

Le compteur d'essieux permet de détecter si un canton est occupé ou libre. Pour cela, il compare le nombre d'essieux qui entrent et sortent du canton. À chaque extrémité du canton, on installe un point de comptage formé de deux détecteurs décalés.

- Lorsqu'un train entre, le système compte les essieux et incrémente un compteur d'entrée.
- Quand le train sort, le système fait de même avec un compteur de sortie.

♣ **Remarque :** Le centre de traitement vérifie en permanence si le nombre d'essieux entrés dans le canton est égal au nombre d'essieux sortis. Si le nombre d'essieux entrés et sortis est identique, la voie est libre ; sinon, elle est considérée comme occupée pour des raisons de sécurité.

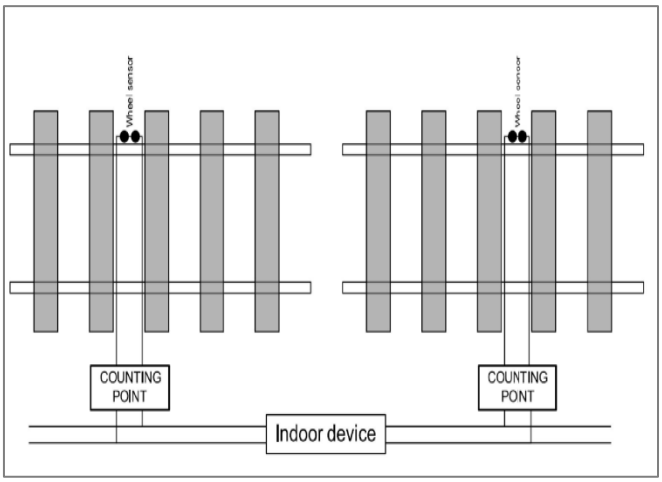


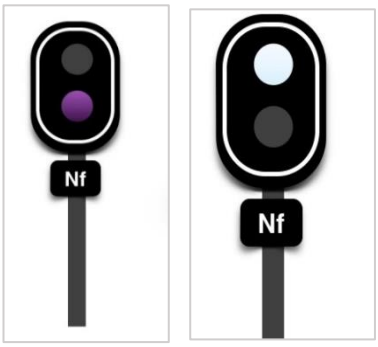
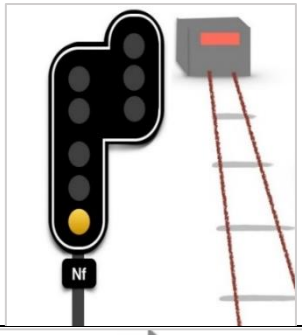
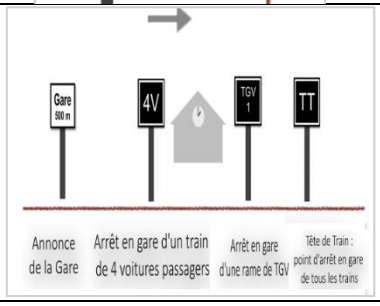
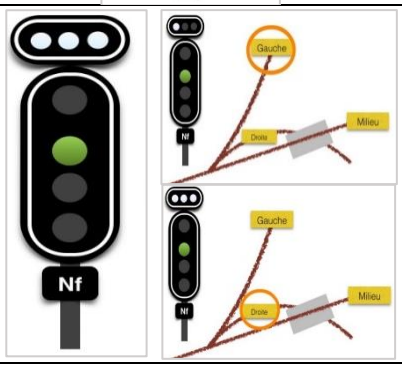
Figure XII.2: Principe du compteur d'essieu

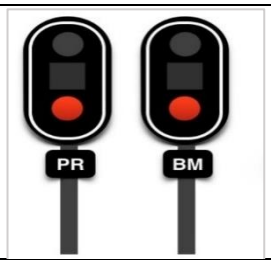
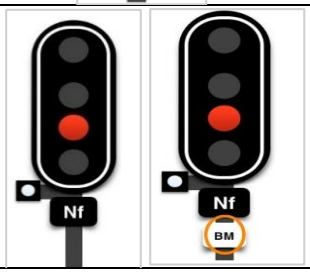
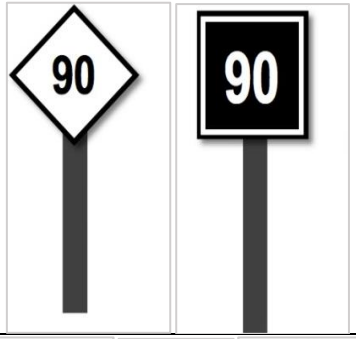
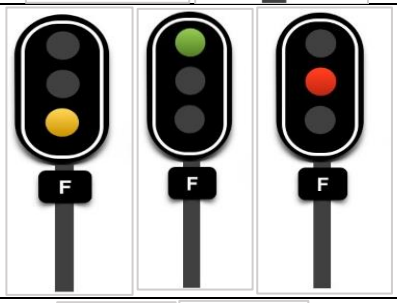
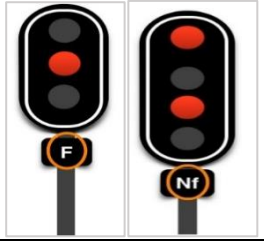
Le compteur d'essieux a pour rôle de :

- Remplir le même rôle qu'un circuit de voie (CdV), c'est-à-dire détecter la présence d'un train dans un canton.
- Être utilisé dans les zones où l'isolement de la voie est difficile ou coûteux (ex. : tunnels, ponts métalliques).
- Être affecté à un seul canton.

XII.5 Classification de signalisation ferroviaire

Tableau XII.2 : Signaux ferroviaires

Catégorie	Signification	Remarques	Illustration
Voies de manœuvre	-Feu violet = non franchissable -Feu blanc = voie libre	Signal lumineux spécifique pour les mouvements à faible vitesse	
Signal d'avertissement	Annonce un heurtoir ou un signal à venir	Composé d'un feu jaune et rouge en ligne horizontale	
Panneaux d'arrêt gare	-4V = train de 4 voitures -TT = tous types de trains	Indiquent la position d'arrêt en gare selon le type et la longueur	
Avertissement BPR/BM	Lettre "A" sur fond blanc	Indique un avertissement en BPR ou BM	
Indicateur de direction	-Feu blanc seul = gauche -Trois feux blancs = droite	Oriente le train à l'approche des aiguillages	

Sémaphores non franchissables	-PR = sémaphore - BPR, BM = sémaphore BM	Présentent un carré rouge fixe : signal non franchissable	
Plaque NF	Signal non franchissable	Identification par plaque ; feu carré blanc ou rouge selon l'état	
Type de sémaphore	BAL, BAPR, BM selon la plaque blanche	Permet d'identifier et distinguer les signaux fixes à feu rouge	
Panneaux de limitation (TIV)	-TIVD = limitation à distance (losange) - TIV = rappel (carré)	Affichent les limitations de vitesse à l'approche d'un aiguillage	
Feux clignotants	-Rouge clignotant = anticipation arrêt -Jaune clignotant = ralentissement -Vert clignotant = un ralentissement ou un avertissement	Utilisés pour les trains > 160 km/h ou signal d'annonce d'arrêt	
Plaques d'identification	-NF = non franchissable -F = franchissable (un sémaphore de B)	Permet d'identifier si le signal est un sémaphore ou non	

XII.6 ERTMS : un système moderne pour la signalisation ferroviaire

L'ERTMS (European Rail Traffic Management System) est un système européen standardisé de signalisation ferroviaire et de contrôle des trains, mis en place pour répondre au besoin d'interopérabilité entre les différents réseaux nationaux. Il est constitué principalement de deux sous-systèmes :

- ETCS (European Train Control System) : le système de signalisation et de contrôle commande.
- GSM-R : la norme de communication radio dédiée au ferroviaire.

Ses objectifs principaux sont les suivants :

- Supprimer les barrières techniques entre les pays et garantir l'interopérabilité.
- Améliorer la sécurité, la capacité et les performances du réseau ferroviaire.
- Réduire les coûts d'exploitation et de maintenance.
- Permettre une signalisation embarquée, indépendante de la signalisation latérale traditionnelle.

Les fonctions principales de l'ERTMS sont les suivantes :

- Assurer le contrôle automatique de la vitesse du train et déclencher le freinage d'urgence en cas de dépassement ou de situation dangereuse.
- Faciliter la circulation entre différents réseaux ferroviaires européens, grâce à l'interopérabilité du système.
- Maintenir une liaison continue entre le train et les équipements au sol via le système de communication GSM-R.
- Autoriser le mouvement du train jusqu'au prochain signal, en se basant sur le principe du cantonnement.
- Permettre au train de communiquer en temps réel sa position et sa vitesse, via une antenne embarquée.
- Renforcer la sécurité de l'exploitation ferroviaire en assurant une surveillance permanente et une gestion automatisée des espacements entre trains.
- Appliquer les restrictions de vitesses transmise au conducteur via l'interface de bord.

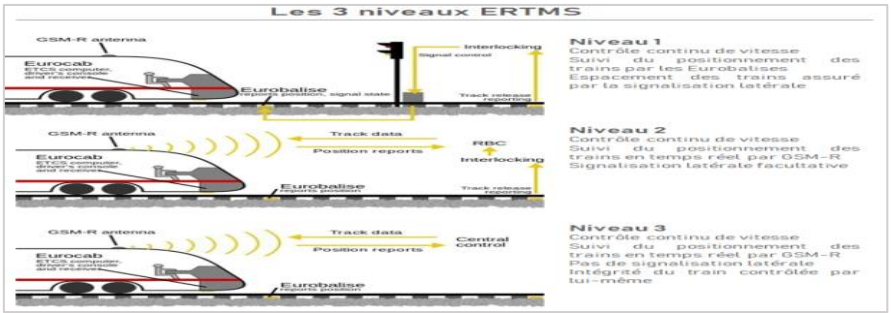


Tableau XII.3 : Niveaux du système de contrôle des trains ERTMS

XII.7 Application au projet

Le projet de la gare de Gara Djebilet est caractérisé par un système de signalisation moderne et sécurisé répondant aux normes ferroviaires. Ses principales caractéristiques techniques sont les suivantes :

- La détection des trains est assurée par des compteurs d'essieux positionnés le long de la voie.
- Le cantonnement retenu est le Block Automatique Lumineux (BAL) en voie unique, garantissant la sécurité et la fluidité des circulations.
- La signalisation est assurée par des dispositifs lumineux latéraux, installés dans les gares et PCG, complétés par le système de protection ERTMS/ETCS de niveau 1.
- La transmission des données s'appuie sur un réseau de fibres optiques et sur la technologie radio Sol Train pour une communication continue.
- Le contrôle global des circulations est centralisé au niveau d'un Poste de Commande Centralisé (PCC).

XII.8 Conclusion

La signalisation ferroviaire occupe une place essentielle dans la sécurité et la gestion efficace du trafic des trains. Au fil du temps, elle a évolué, passant de systèmes traditionnels comme les signaux mécaniques à des technologies modernes, automatisées et plus fiables.

Grâce à l'utilisation d'équipements avancés tels que les compteurs d'essieux, les balises et la communication GSM-R, la circulation des trains devient plus rapide, plus sécurisée et interopérable entre différents réseaux nationaux.

Cette approche est clairement illustrée dans le projet de la ligne minière ouest, qui témoigne de la capacité de l'Algérie à moderniser ses infrastructures ferroviaires en intégrant des systèmes conformes aux standards internationaux, afin de garantir une circulation plus fluide, plus sûre et adaptée aux exigences du transport ferroviaire moderne.

CHAPITRE XIII

Devis Quantitatif et Estimatif

XIII. Devis quantitatif et estimatif

XIII.1 Introduction

La réalisation des infrastructures de construction constitue un investissement important pour les pouvoirs publics, ce qui rend essentielle la maîtrise des quantités et des coûts d'exécution. Toute opération de construction nécessite une estimation précise des dépenses, permettant au maître d'ouvrage d'évaluer sa capacité de financement en fonction du budget disponible.

Dans ce chapitre, nous allons établir le devis quantitatif et estimatif (DQE) du tronçon concerné par ce projet. Cela nous permettra d'estimer les quantités de matériaux nécessaires, d'évaluer les coûts associés et de bien répartir le budget pour chaque partie du projet.

XIII.2 Application au projet étudié

N des prix	Désignations	Unité	Prix unitaire	Quantité	Montant
1- ETUDES D'EXECUTION ET INSTALLATION GENERALE DE CHANTIER					
1-1	Installations du matériel et installations globale du chantier	F	392 981 592.94	1	392 981 592.94
1-2	Repli du matériel et des installations du chantier	F	196 490 796.47	1	196 490 796.47
1-3	Fourniture et installation d'un laboratoire de chantier	F	98 245 398.24	1	98 245 398.24
Prix total d'installation général de chantier DA					**687 717 787.65**
2- Étude D'EXECUTION					
2-1	Etude exécution	F	90000000.00	1	90000000.00
Prix total de l'étude d'exécution					**90 000 000.00**
3- LES TERRASSEMENTS					
3-1	Décapage de terre végétale	M^3	750.00	52 57	2 392 188975.00
3-2	Matériaux mis en Déblais	M^3	1200.00	299675	359 60924.00
3-3	Matériaux mis en Remblais	M^3	2500.00	1009306	2 523 264 600.00
Prix total des Terrassements DA					**75 392 339**
4- DRAINAGE ET ASSAINISSEMENT					
4-1	Fossé en béton arme préfabriqué	ML	8000.00	13 956	111 642 080.00
4-2	Buses de tuyaux en béton armé 2000 mm	ML	62000.00	82	5 084 000.00
4-3	Buses de tuyaux en béton armé 1500 mm	ML	50000.00	1 245	62 250 000.00
4-4	Buses de tuyaux en béton armé 1200 mm	ML	42000.00	324	13 616 400.00
Prix total Drainage et assainissement DA					**192 592 480**
5- COUCHES D'ASSISE FERROVIAIRE					
5-1	Mise en place et réalisation de la couche de ballast	M^3	7500.00	37821	283 655 175.00
5-2	Mise en place et réalisation de la couche de forme	M^3	2600.00	56633	147 245 072.00
5-3	Mise en place et réalisation de la couche de fondation	M^3	3500.00	29729	104 049 960.00
5-4	Mise en place et réalisation de la couche S/Ballast	M^3	3500.00	27814	97 347 775.00
Prix total Terrassements généraux DA					**632 297 982**
6- TRAVAUX DE LA VOIE					
6-1	Fourniture et pose ballast	U	7400.00	364 304	2 695 851 450.00

6-2	Traverses mono bloc	U	12000.00	25 980	311 760 000.00
6-3	Fourniture des attaches pour le rail UIC 60	U	1800.00	1 190 670	2 143 206 000.00
6-4	Pose de voie	ML	7000.00	161 913	1 133 391 000.00
6-5	Fourniture des appareils de voie simples UIC 60 -500-1/12	U	18 900 000.00	2	37 800 000.00
6-6	Pose des appareils de voie simple UIC 60 -500-1/12	U	654 000.00	2	1 308 000.00
6-7	Soudage aluminothermique	U	22000.00	128	2 816 000.00
6-8	Soudage électrique	U	22000.00	1653	36 366 000.00
6-9	Traverses de Garage franc	U	55 000.00	2	110 000.00
Prix Total Travaux de la voie DA					**2 606 706 062**
7- GARE					
7-1	PCG	F	**67 791 432.67**	1	**67 791 432.67**
Prix Total de PCG en DA					**67 791 433.00**
Prix Total Hors Taxes					**7 237 411 003.32**
Montant de la T.V.A (19%)					**1 375 108 090.63**
Montant du projet en T.T.C					**8 612 519 093.95**

♣ **Montant total en TTC**

Huit milliards six cent douze millions cinq cent dix-neuf mille

quatre-vingt-quatorze Dinars Algériens

XIII.3 Conclusion

Ce chapitre a permis d'estimer les quantités, les coûts unitaires et le budget global du projet. Le montant total du projet s'élève à 8,61 milliards DA TTC, couvrant tous les postes : installations de chantier, terrassements, drainage, assises ferroviaires, voie ferrée et gare.

Ce devis constitue une base essentielle pour la planification, le contrôle budgétaire et la bonne exécution du projet.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce projet de fin d'études a porté sur l'étude technique détaillée d'un tronçon de 15 km (PK 255+000 à PK 270+000) de la future ligne ferroviaire minière Béchar – Tindouf – Gara Djebilet, destinée à l'acheminement massif du minerai de fer vers les infrastructures portuaires du nord. Réalisé dans le cadre de l'Avant-Projet Détaillé (APD), ce travail s'inscrit dans les efforts nationaux de développement des infrastructures ferroviaires au service de l'économie.

L'étude a intégré l'ensemble des composantes nécessaires à la conception d'une ligne ferroviaire conforme aux normes de la SNTF et de l'UIC : géométrie du tracé, profil en long et en travers, assise ferroviaire, superstructure, terrassements, ouvrages hydrauliques, étude géotechnique, environnementale et conception d'un PCG. Une attention particulière a été accordée à l'adaptation du projet aux contraintes du contexte saharien : climat aride, sol partiellement agressif, zones à risque d'ensablement et faible sismicité.

Sur le plan technique, la plateforme a été dimensionnée pour une charge d'essieu de 32.5 t, avec une couche d'assise de 70 cm et une voie unique à écartement normal (1435 mm), apte au trafic mixte (160 km/h pour les voyageurs et 70 km/h pour les marchandises). Le tracé a été optimisé par l'utilisation des logiciels *Civil 3D* et *Geo5* pour garantir la régularité géométrique, la stabilité des talus et l'efficacité du drainage. Le système de signalisation repose sur un cantonnement BAL, avec détection par compteur d'essieux et intégration du système ERTMS niveau 1.

En somme, ce projet nous a permis de développer une vision d'ensemble sur les différentes disciplines de l'ingénierie ferroviaire, en combinant théorie, normes techniques, outils de modélisation, et contraintes terrain. Il offre une solution robuste, réaliste et conforme aux exigences de ce projet national d'envergure, tout en constituant une base solide pour des développements ultérieurs et une exploitation durable de la ligne minière vers Gara Djebilet.

Bibliographie

Bibliographie

[1] COSIDER INGENIERING, Rapport hydrologie et hydraulique. Projet de réalisation du tronçon de 575 km de la ligne minière ferroviaire Béchar – Tindouf – Gara Djebilet. [Rapport technique].

[2] « SETO », Rapport technique de l'étude de conception de la nouvelle ligne ferroviaire Béchar – Tindouf (950 km).

[3] « SETO », Rapport géotechnique – Tronçon du projet de réalisation de 575 km de la ligne minière ferroviaire Béchar – Tindouf – Gara Djebilet.

[4] IN 00274, La mise en œuvre du ballast, Référentiel technique infrastructure ferroviaire.

[5] IN 0272, Référentiel infrastructure, version 01 : Conception du tracé de la voie courante V ≤ 220 km/h.

[5] IN-03278-Tome 2, Ouvrages en terre, Référentiel technique.

[6] Rétiveau, R., *La signalisation ferroviaire*, Paris : Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. (1987).

[7] RPA 99/version 2003, Règles parasismiques algériennes.

[8] SNCF, *Document Métier Voie – Fascicule 1*, IN 2547, éd. 15-01-2003.

[9] SNTF, Référentiel technique, version 2, chapitre 6 : Géométrie de la voie.

[10] SNTF, Référentiel technique, version 2, chapitre 7.2.2 : Ouvrages en terre pour plates-formes ferroviaires.

[11] SNTF, Référentiel technique, chapitre 10 : Signalisation et télécommunication, version 2.

[12] Stéra, *Guide technique : Assainissement routier*, octobre 2006.

[13] « UIC 719 », Ouvrages en terre et couches d'assises ferroviaires.

[14] « UIC 739 », Marges de glissement à l'aval des signaux.

[15] Mémoires de voie ferrée, École Nationale des Travaux Publics.

[16] ENSG R. MORSLI, Cours voie ferrée ; ENSG R. RAHMANI, Cours hydraulique appliquée ; ENSG Berriche et ENSG Hamadi, Cours MDS. [Support pédagogique, École Nationale Supérieure des Géomètres].

ANNEXE

ANNEXE A : Listing de l'axe en plan

Axe en plan: VP

Plage d'abscisse : Début: 255+000, Fin: 270+140

LONGUEUR DE L'AXE : 15140.000m

Elem	Caractéristiques	Longueur	Abscisse	X	Y
			255+000	424916.3618	3340302.6617
DR1	ANG=233.5238 (g)	763.956			
			255+764	424532.4056	3339642.2025
CLO2	A=415.331				
	R=2300.000	75.000			
			255+839	424494.3601	3339577.5696
ARC3	XC=422525.0625				
	YC=3340765.7898				
	R=2300.000	1180.386			
			257+019	423657.2711	3338763.7649
CLO4	A=415.331				
	R=2300.000	75.000			
			257+094	423591.5910	3338727.5573
DR5	ANG=268.2718 (g)	650.088			
			257+744	423020.5822	3338416.8100
CLO6	A=426.615				
	R=2600.000	70.000			
			257+814	422959.2486	3338383.0742
ARC7	XC=424232.6977				
	YC=3336116.2862				
	R=2600.000	1311.322			
			259+126	422022.4021	3337485.4441
CLO8	A=426.615				
	R=2600.000	70.000			

			259+196	421986.0759	3337425.6082
DR9	ANG=234.4496 (g)	3189.395			
			262+385	420343.1931	3334691.8969
CLO10	A=435.890				
	R=1900.000	100.000			
			262+485	420290.9340	3334606.6422
ARC11	XC=418688.7123				
	YC=3335627.8598				
	R=1900.000	1001.067			
			263+486	419560.1371	3333939.4822
CLO12	A=435.890				
	R=1900.000	100.000			
			263+586	419470.4869	3333895.1851
DR13	ANG=271.3423 (g)	1269.085			
			264+855	418327.8281	3333343.0015
CLO14	A=415.331				
	R=2300.000	75.000			
			264+930	418260.4787	3333310.0025
ARC15	XC=419294.8472				
	YC=3331255.7188				
	R=2300.000	854.314			
			265+785	417585.3977	3332794.4788
CLO16	A=415.331				
	R=2300.000	75.000			
			265+860	417535.8302	3332738.1945
DR17	ANG=245.6197 (g)	1416.303			
			267+276	416605.5747	3331670.2347
CLO18	A=400.000				
	R=2000.000	80.000			

			267+356	416552.6291	3331610.2636
ARC19	XC=415071.1064				
	YC=3332953.8002				
	R=2000.000	577.257			
			267+933	416108.9248	3331244.1415
CLO20	A=400.000				
	R=2000.000	80.000			
			268+013	416039.9923	3331203.5449
DR21	ANG=266.5409 (g)	551.361			
			268+565	415563.0456	3330926.9218
CLO22	A=435.890				
	R=1900.000	100.000			
			268+665	415476.9881	3330875.9955
ARC23	XC=416473.1539				
	YC=3329258.0790				
	R=1900.000	618.544			
			269+283	415011.8543	3330472.4116
CLO24	A=435.890				
	R=1900.000	100.000			
			269+383	414949.3030	3330394.3941
DR25	ANG=242.4651 (g)	756.982			
			270+140	414480.9857	3329799.6669

ANNEXE B : Abscisse Sommets et Raccordements

Profil en long : FSR

Plage d'abscisse : Début : 255+000, Fin : 270+000,

LONGUEUR DE L'AXE : 15140.000m

Elément	Caractéristiques des éléments	Longueur	Abscisse	Z
			255+000	702.295
D1	PENTE= -0.74%	3497.068		
			258+497	676.590
ARC1	S= 258+552 Z=676.185			
	R= -15000.000	110.253		
			258+607	676.185
D2	PENTE= 0.00%	3476.486		
			262+084	676.185
ARC2	S= 262+144 Z=676.185			
	R= -20000.000	120.845		
			262+205	675.820
D3	PENTE= -0.60%	2171.407		
			264+376	662.699
ARC3	S= 264+407 Z=662.510			
	R= -30000.000	62.694		
			264+439	662.386
D4	PENTE= -0.40%	2206.791		
			266+646	653.664
D5	PENTE= -0.47%	3494.515		
			270+140	637.287

ANNEXE C : Canalisation circulaire partiellement remplie

CANALISATIONS CIRCULAIRES PARTIELLEMENT REMPLIES

H/D	TETA	Q/QPS	V/VPS	S/SPS	L/D	$R_{H/D}$	RER
0.02	0.2838	0.001	0.14	0.005	0.280	0.013	0.151
0.04	0.4027	0.003	0.22	0.013	0.392	0.026	0.187
0.06	0.4949	0.007	0.29	0.024	0.475	0.039	0.210
0.08	0.5735	0.013	0.35	0.037	0.543	0.051	0.228
0.10	0.6435	0.021	0.40	0.052	0.600	0.064	0.241
0.12	0.7075	0.031	0.45	0.068	0.650	0.075	0.251
0.14	0.7670	0.042	0.50	0.085	0.694	0.087	0.260
0.16	0.8230	0.056	0.54	0.103	0.733	0.099	0.266
0.18	0.8763	0.071	0.58	0.122	0.768	0.110	0.272
0.20	0.9273	0.088	0.62	0.142	0.800	0.121	0.276
0.22	0.9764	0.106	0.65	0.163	0.828	0.131	0.279
0.24	1.0239	0.126	0.68	0.185	0.854	0.142	0.281
0.26	1.0701	0.148	0.72	0.207	0.877	0.152	0.283
0.28	1.1152	0.171	0.75	0.229	0.898	0.161	0.284
0.30	1.1593	0.196	0.78	0.252	0.917	0.171	0.284
0.32	1.2025	0.222	0.80	0.276	0.933	0.180	0.284
0.34	1.2451	0.249	0.83	0.300	0.947	0.189	0.283
0.36	1.2870	0.277	0.86	0.324	0.960	0.198	0.281
0.38	1.3284	0.307	0.88	0.349	0.971	0.206	0.279
0.40	1.3694	0.337	0.90	0.374	0.980	0.214	0.277
0.42	1.4101	0.368	0.92	0.399	0.987	0.222	0.274
0.44	1.4505	0.400	0.94	0.424	0.993	0.229	0.271
0.46	1.4907	0.433	0.96	0.449	0.997	0.237	0.268
0.48	1.5308	0.466	0.98	0.475	0.999	0.243	0.264
0.50	1.5708	0.500	1.00	0.500	1.000	0.250	0.260
0.52	1.6108	0.534	1.02	0.525	0.999	0.256	0.255
0.54	1.6509	0.568	1.03	0.551	0.997	0.262	0.250
0.56	1.6911	0.603	1.05	0.576	0.993	0.268	0.245
0.58	1.7315	0.637	1.06	0.601	0.987	0.273	0.239
0.60	1.7722	0.672	1.07	0.626	0.980	0.278	0.233
0.62	1.8132	0.706	1.08	0.651	0.971	0.282	0.227
0.64	1.8546	0.740	1.09	0.676	0.960	0.286	0.221
0.66	1.8965	0.773	1.10	0.700	0.947	0.290	0.214
0.68	1.9391	0.806	1.11	0.724	0.933	0.293	0.207
0.70	1.9823	0.837	1.12	0.748	0.917	0.296	0.200
0.72	2.0264	0.868	1.13	0.771	0.898	0.299	0.192
0.74	2.0715	0.898	1.13	0.793	0.877	0.301	0.184
0.76	2.1176	0.926	1.14	0.815	0.854	0.302	0.175
0.78	2.1652	0.953	1.14	0.837	0.828	0.304	0.166
0.80	2.2143	0.977	1.14	0.858	0.800	0.304	0.157
0.82	2.2653	1.000	1.14	0.878	0.768	0.304	0.148
0.84	2.3186	1.021	1.14	0.897	0.733	0.304	0.138
0.86	2.3746	1.039	1.14	0.915	0.694	0.303	0.127
0.88	2.4341	1.054	1.13	0.932	0.650	0.301	0.116
0.90	2.4981	1.066	1.12	0.948	0.600	0.298	0.104
0.92	2.5681	1.073	1.12	0.963	0.543	0.294	0.091
0.94	2.6467	1.076	1.10	0.976	0.475	0.289	0.077
0.96	2.7389	1.071	1.09	0.987	0.392	0.283	0.061
0.98	2.8578	1.057	1.06	0.995	0.280	0.274	0.041
1.00	3.1416	1.000	1.00	1.000	0.000	0.250	0.000

ANNEXE D :

D.1 Localisation des sondages et essais in -situ réalisés du P K255+000 au PK270+000

Type	Localisation	Essai in situ	Profondeur (m)
Plateforme	PK 257+000	PU-67-L/MTB	4.00
Plateforme	PK 257+000	PDL-64-L/MTB	refus
Plateforme	PK 259+891	PU-68-L/MTB	4.00
Plateforme	PK 259+891	PDL-65-L/MTB	refus
Remblai	PK 260+500	F-29-L/MTB	10.00
Déblai	PK 262+907	F-30-L/MTB	4.00
Déblai	PK 262+907	PU-69-L/MTB	refus
Déblai	PK 262+907	PDL-66-L/MTB	refus
Plateforme	PK 264+100	PDL-67-L/MTB	refus
Plateforme	PK 265+700	PU-70-L/MTB	4.00
Remblai	PK 267+000	PDL-68-L/MTB	refus
Remblai	PK 267+000	PU-71-L/MTB	4.00
Remblai	PK 269+500	PDL-69-L/MTB	refus
Remblai	PK 269+500	PU-72-L/MTB	4.00

D.2 Résultats des essais SPT et Résistance à la compression simple

Sondage	Localisation	Profondeur (m)	N	angle de frottement (φ)	classification	Rc (mpa)
Sc 15	PK 258+600	0.6 – 6.45	52.0	> 40°	très compact	/
Sc 17	PK 263+625	3.0 – 3.45	53.0	> 40°	très compact	/
Sc 16	PK 259+175	6.7 – 7.0	/	/	Qs2	21.1

D.3 Pénétration dynamique lourd

PK	N° PDL	OBSERVATION
257+000	64	Refus à 0.6
259+891	65	Refus à 0.6
262+907	66	Refus à 0.6
265+100	67	Refus à 0.6
267+700	68	Refus à 0.6
269+500	69	Refus à 0.6

D.4 Étude de stabilité des talus (remblai/déblai) selon les résultats du logiciel GEO5

ENSTP
Garidi, KOUBA
ALGER ALGERIE

Calcul de la stabilité de pente

Données d'entrée (Phase de construction 1)

Projet

Date : 10/06/2025

Paramètres

Standard - coefficients de sécurité

Calcul de la stabilité

Méthode de vérification : coefficients de sécurité
Calcul du séisme : Standard

Coefficients de sécurité			
Situation de calcul permanente			
Coefficient de sécurité :	SF_s =	1,50	[–]

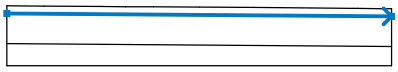
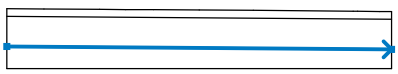
Coefficients de sécurité			
Situation de calcul au séisme			
Coefficient de sécurité :	SF_s =	1,00	[–]

Ancrages

Méthode de vérification : coefficients de sécurité

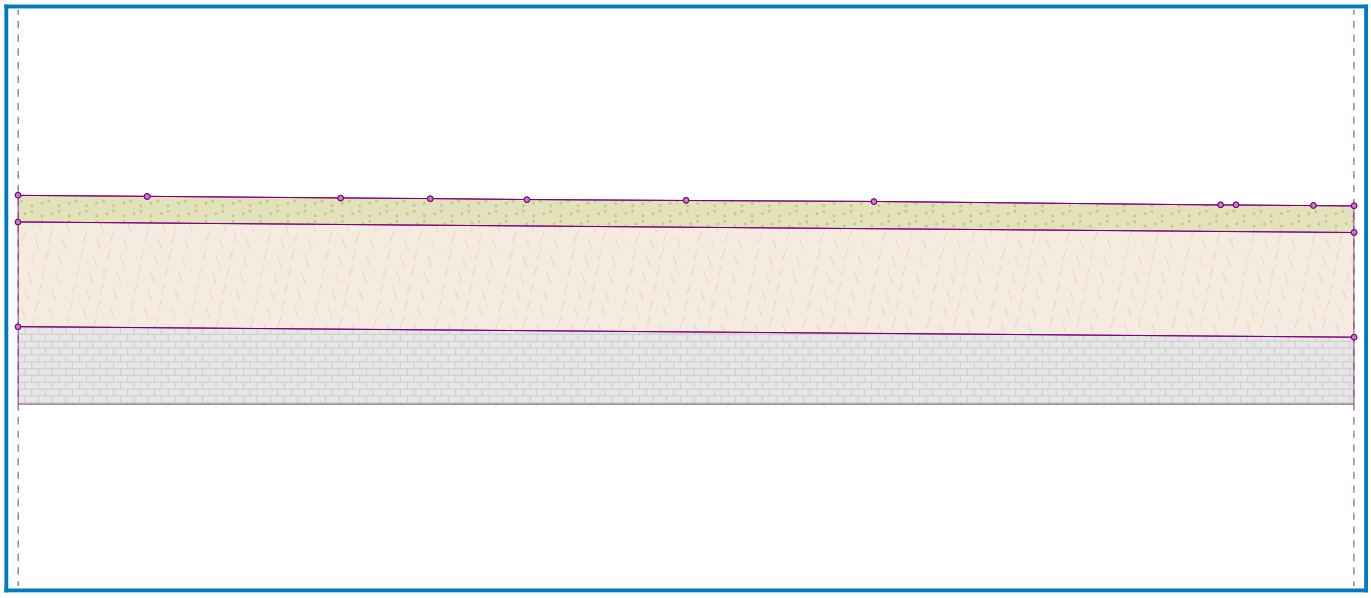
Coefficients de sécurité			
Coefficient de sécurité à la rupture :	SF_t =	1,50	[–]
Coefficient de sécurité à l'arrachement du sol :	SF_e =	1,50	[–]
Coefficient de sécurité de la résistance à l'arrachement du coulis de ciment :	SF_c =	1,50	[–]

Interface

N°	Placement de l'interface	Coordonnées des points de l'interface [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		0,00	2,87	5,80	2,82	14,49	2,75
		18,52	2,72	22,86	2,68	30,00	2,64
		38,44	2,59	54,01	2,44	54,70	2,44
		58,17	2,41	60,00	2,40		
2		0,00	1,67	60,00	1,20		
3		0,00	-3,03	60,00	-3,50		

[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

ENSTP
Garidi, KOUBA
ALGER ALGERIE



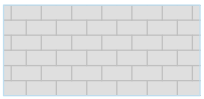
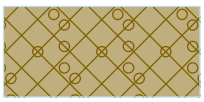
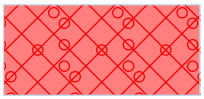
Paramètres des sols - état de contraintes effectives

N°	Nom	Echantillon	φ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	γ [kN/m³]
1	Sable moyen		30,00	2,00	18,00
2	encroutement greso-calcaire		30,00	25,00	20,00
3	calcaire greseux		22,00	45,00	24,00
4	remblai		30,00	5,00	20,00
5	remblai superieur		30,00	10,00	20,00

Paramètres des sols - soulèvement hydraulique

N°	Nom	Echantillon	γ_{sat} [kN/m³]	γ_s [kN/m³]	n [–]
1	Sable moyen		18,00		
2	encroutement greso-calcaire		20,00		

[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

N°	Nom	Echantillon	γ_{sat} [kN/m^3]	γ_s [kN/m^3]	n [–]
3	calcaire greseux		24,00		
4	remblai		20,00		
5	remblai superieur		20,00		

Paramètres des sols

Sable moyen

Poids volumique :	γ = 18,00 kN/m^3
État de contrainte :	effectives
Résistance au cisaillement :	Mohr-Coulomb
Angle de frottement interne :	φ_{ef} = 30,00 °
Cohésion du sol :	c_{ef} = 2,00 kPa
Poids volumique du sol saturé :	γ_{sat} = 18,00 kN/m^3

encroutement greso-calcaire

Poids volumique :	γ = 20,00 kN/m^3
État de contrainte :	effectives
Résistance au cisaillement :	Mohr-Coulomb
Angle de frottement interne :	φ_{ef} = 30,00 °
Cohésion du sol :	c_{ef} = 25,00 kPa
Poids volumique du sol saturé :	γ_{sat} = 20,00 kN/m^3

calcaire greseux

Poids volumique :	γ = 24,00 kN/m^3
État de contrainte :	effectives
Résistance au cisaillement :	Mohr-Coulomb
Angle de frottement interne :	φ_{ef} = 22,00 °
Cohésion du sol :	c_{ef} = 45,00 kPa
Poids volumique du sol saturé :	γ_{sat} = 24,00 kN/m^3

remblai

Poids volumique :	γ = 20,00 kN/m^3
État de contrainte :	effectives
Résistance au cisaillement :	Mohr-Coulomb
Angle de frottement interne :	φ_{ef} = 30,00 °
Cohésion du sol :	c_{ef} = 5,00 kPa
Poids volumique du sol saturé :	γ_{sat} = 20,00 kN/m^3

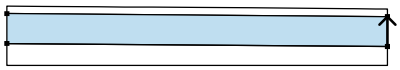
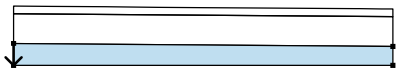
remblai superieur

Poids volumique :	γ = 20,00 kN/m^3
État de contrainte :	effectives
Résistance au cisaillement :	Mohr-Coulomb

[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

Angle de frottement interne : φ_{ef} = 30,00 °
Cohésion du sol : c_{ef} = 10,00 kPa
Poids volumique du sol saturé : γ_{sat} = 20,00 kN/m^3

Assignation et surfaces

N°	Placement de la surface	Coordonnées des points de la surface [m]				Sol assigné
		x	z	x	z	
1		60,00	1,20	60,00	2,40	Sable moyen
		58,17	2,41	54,70	2,44	
		54,01	2,44	38,44	2,59	
		30,00	2,64	22,86	2,68	
		18,52	2,72	14,49	2,75	
		5,80	2,82	0,00	2,87	
		0,00	1,67			
2		60,00	-3,50	60,00	1,20	encroutement
		0,00	1,67	0,00	-3,03	greso-calcaire
3		0,00	-3,03	0,00	-6,50	calcaire greseux
		60,00	-6,50	60,00	-3,50	

Eau

Type : Pas d'eau

Fissure de traction

La fissure de traction n'est pas saisie.

Séisme

Le séisme n'est pas considéré.

Paramètres du calcul de la phase

Situation de calcul : permanente

Résultats (Phase de construction 1)

Calcul 1 (phase 1)

Surface de glissement circulaire

La surface de glissement n'est pas saisie

Vérification de la stabilité de pente (Bishop)
Le calcul n'a pas été effectué.

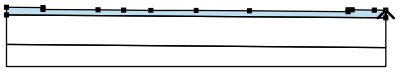
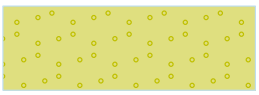
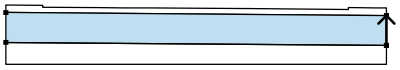
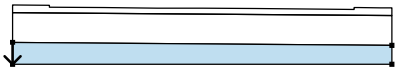
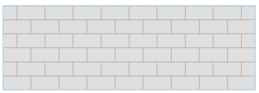
[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

Données d'entrée (Phase de construction 2)

Déblai

N°	Placement du déblai	Coordonnées des points du déblai [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		5,80	2,82	5,80	2,52	14,49	2,45
		18,52	2,42	22,86	2,38	30,00	2,34
		38,44	2,29	54,01	2,14	54,01	2,44

Assignation et surfaces

N°	Placement de la surface	Coordonnées des points de la surface [m]				Sol assigné
		x	z	x	z	
1		60,00	1,20	60,00	2,40	Sable moyen
		58,17	2,41	54,70	2,44	
		54,01	2,44	54,01	2,14	
		38,44	2,29	30,00	2,34	
		22,86	2,38	18,52	2,42	
		14,49	2,45	5,80	2,52	
		5,80	2,82	0,00	2,87	
		0,00	1,67			
2		60,00	-3,50	60,00	1,20	encroutement
		0,00	1,67	0,00	-3,03	greso-calcaire
3		0,00	-3,03	0,00	-6,50	calcaire greseux
		60,00	-6,50	60,00	-3,50	
						

Eau

Type : Pas d'eau

Fissure de traction

La fissure de traction n'est pas saisie.

Séisme

Le séisme n'est pas considéré.

Paramètres du calcul de la phase

Situation de calcul : permanente

Résultats (Phase de construction 2)

Calcul 1 (phase 2)

Surface de glissement circulaire

La surface de glissement n'est pas saisie

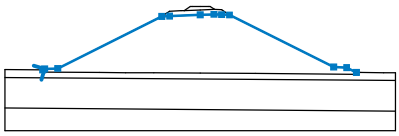
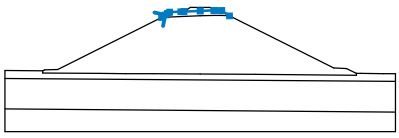
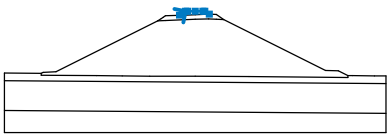
Vérification de la stabilité de pente (Bishop)

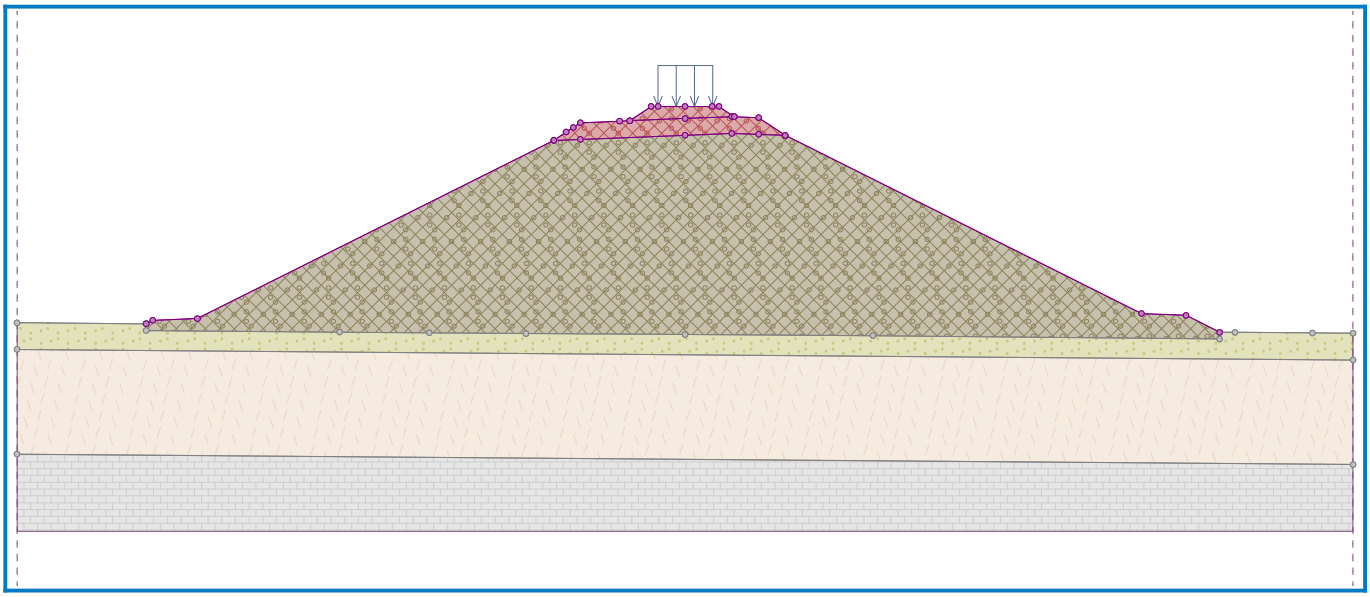
Le calcul n'a pas été effectué.

[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

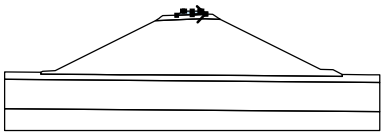
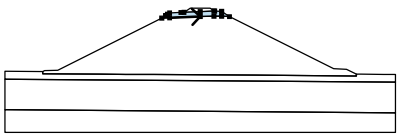
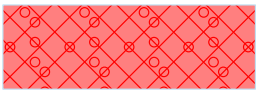
Données d'entrée (Phase de construction 3)

Interface du remblai

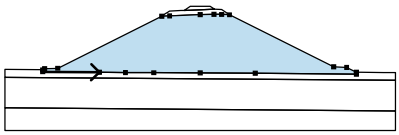
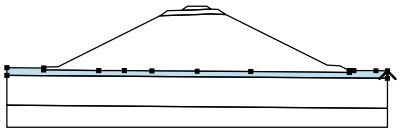
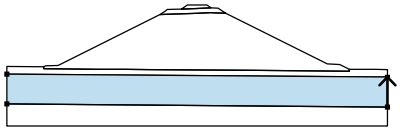
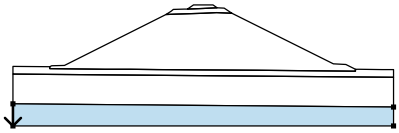
N°	Placement de l'interface	Coordonnées des points de l'interface [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		5,80	2,82	6,10	2,98	8,10	3,06
		24,10	11,06	25,30	11,10	30,00	11,29
		32,10	11,37	33,30	11,33	34,50	11,28
		50,50	3,28	52,50	3,20	54,01	2,44
2		24,10	11,06	24,66	11,43	24,98	11,64
		25,30	11,85	27,06	11,92	27,52	11,94
		30,00	12,04	32,10	12,12	32,21	12,12
		33,30	12,08	34,50	11,28		
3		27,52	11,94	28,48	12,58	28,79	12,58
		30,00	12,58	31,22	12,58	31,52	12,58
		32,21	12,12				



Assignation et surfaces

N°	Placement de la surface	Coordonnées des points de la surface [m]				Sol assigné
		x	z	x	z	
1		30,00	12,04	32,10	12,12	remblai superieur
		32,21	12,12	31,52	12,58	
		31,22	12,58	30,00	12,58	
		28,79	12,58	28,48	12,58	
		27,52	11,94			
2		25,30	11,10	30,00	11,29	remblai superieur
		32,10	11,37	33,30	11,33	
		34,50	11,28	33,30	12,08	
		32,21	12,12	32,10	12,12	
		30,00	12,04	27,52	11,94	
		27,06	11,92	25,30	11,85	
		24,98	11,64	24,66	11,43	

[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

N°	Placement de la surface	Coordonnées des points de la surface [m]				Sol assigné
		x	z	x	z	
		24,10	11,06			
3		5,80	2,52	14,49	2,45	remblai
		18,52	2,42	22,86	2,38	
		30,00	2,34	38,44	2,29	
		54,01	2,14	54,01	2,44	
		52,50	3,20	50,50	3,28	
		34,50	11,28	33,30	11,33	
		32,10	11,37	30,00	11,29	
		25,30	11,10	24,10	11,06	
		8,10	3,06	6,10	2,98	
		5,80	2,82			
4		60,00	1,20	60,00	2,40	Sable moyen
		58,17	2,41	54,70	2,44	
		54,01	2,44	54,01	2,14	
		38,44	2,29	30,00	2,34	
		22,86	2,38	18,52	2,42	
		14,49	2,45	5,80	2,52	
		5,80	2,82	0,00	2,87	
		0,00	1,67			
5		60,00	-3,50	60,00	1,20	encroutement
		0,00	1,67	0,00	-3,03	greso-calcaire
6		0,00	-3,03	0,00	-6,50	calcaire greseux
		60,00	-6,50	60,00	-3,50	

Surcharge

N°	Surcharge		Type	Application	Placement	Origine	Longueur	Largeur	Inclin.	Intensité		
	nouv.	modif.			z [m]	x [m]	l [m]	b [m]	α [°]	q, q_1, f, F, x	q_2, z	unité
1	Oui		bande	constante	z = 12,58	x = 28,79	l = 2,45		0,00	60,00		kN/m^2

Identification des surcharges

N°	Nom
1	charge

Eau

Type : Pas d'eau

Fissure de traction

La fissure de traction n'est pas saisie.

Séisme

Le séisme n'est pas considéré.

[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

Paramètres du calcul de la phase

Situation de calcul : permanente

Résultats (Phase de construction 3)

Calcul 1 (phase 3)

Surface de glissement circulaire

Paramètres de la surface de glissement							
Centre :	x =	7,73	[m]	Angles :	α_1 =	0,63	[°]
	z =	36,83	[m]		α_2 =	44,10	[°]
Rayon :	R =	33,77	[m]				
Surface de glissement après l'optimisation.							

Le poids total du sol au-dessus de la surface de cisaillement: 1175,87 kN/m

Vérification de la stabilité de pente (Bishop)

Somme des forces actives : F_a = 545,89 kN/m

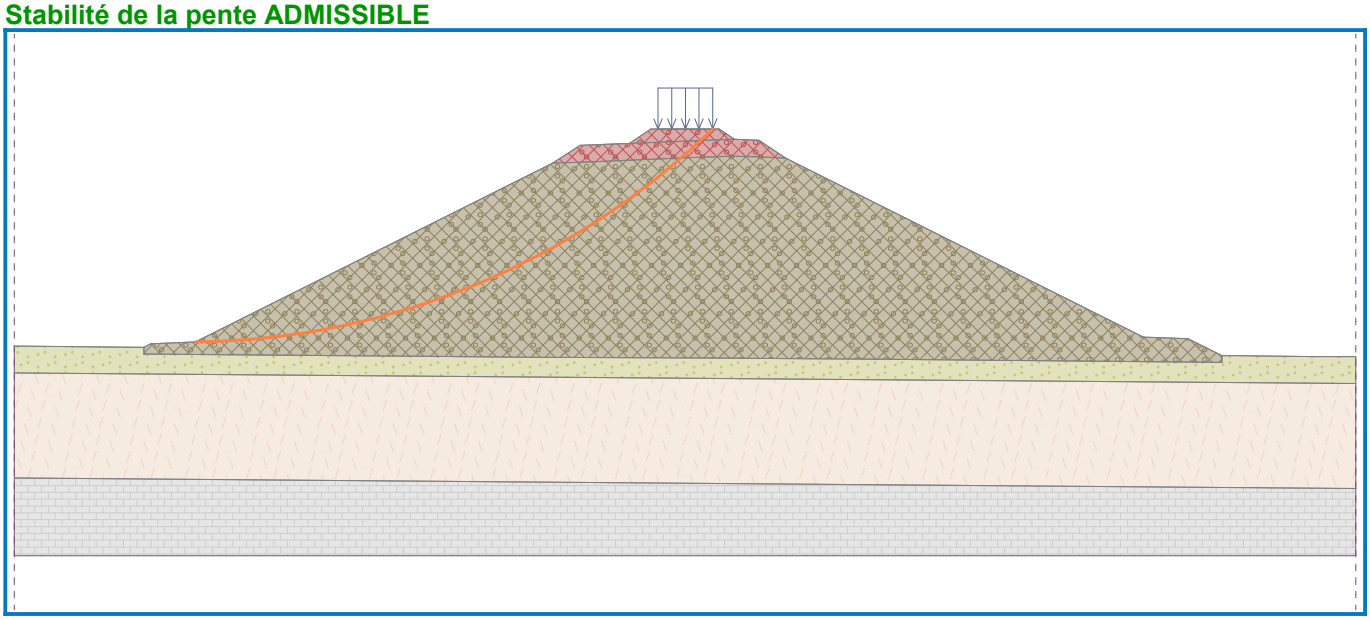
Somme des forces passives : F_p = 849,77 kN/m

Moment de glissement : M_a = 18434,67 kNm/m

Moment résistant : M_p = 28696,62 kNm/m

Coefficient de sécurité = 1,56 > 1,50

Stabilité de la pente ADMISSIBLE



Calcul 2 (phase 3)

Surface de glissement circulaire

Paramètres de la surface de glissement							
Centre :	x =	50,92	[m]	Angles :	α_1 =	-45,66	[°]
	z =	34,17	[m]		α_2 =	-0,79	[°]
Rayon :	R =	30,89	[m]				
Surface de glissement après l'optimisation.							

Le poids total du sol au-dessus de la surface de cisaillement: 1022,42 kN/m

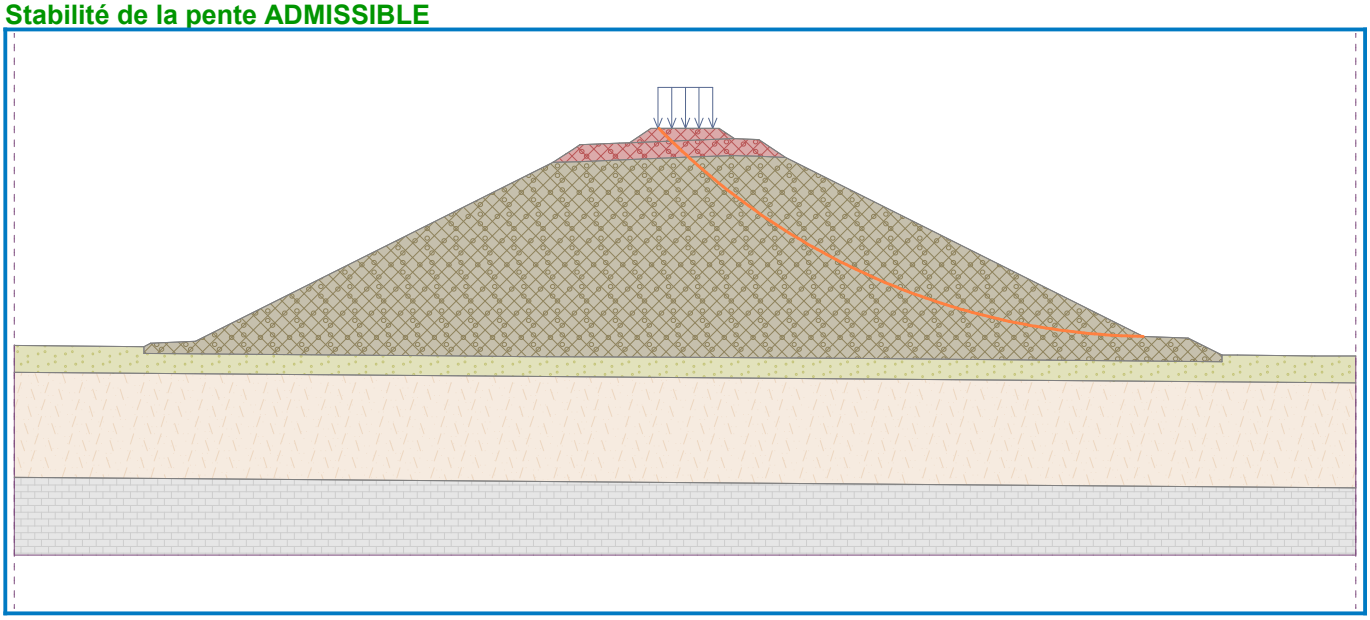
Vérification de la stabilité de pente (Bishop)

Somme des forces actives : F_a = 502,52 kN/m

Somme des forces passives : F_p = 754,60 kN/m

[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

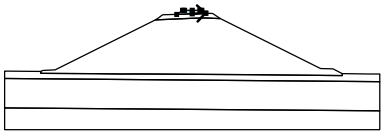
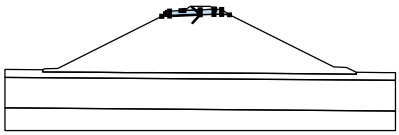
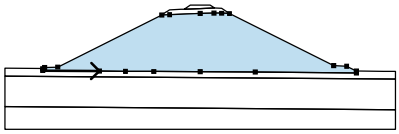
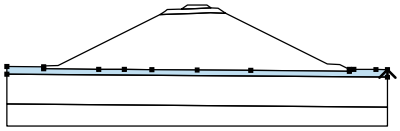
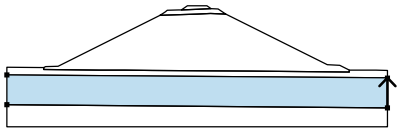
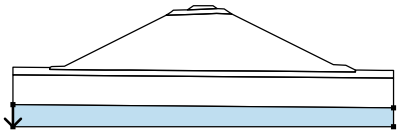
Moment de glissement : M_a = 15522,72 kNm/m
Moment résistant : M_p = 23309,65 kNm/m
Coefficient de sécurité = 1,50 > 1,50
Stabilité de la pente ADMISSIBLE



[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

Données d'entrée (Phase de construction 4)

Assignation et surfaces

N°	Placement de la surface	Coordonnées des points de la surface [m]				Sol assigné
		x	z	x	z	
1		30,00	12,04	32,10	12,12	remblai superieur
		32,21	12,12	31,52	12,58	
		31,22	12,58	30,00	12,58	
		28,79	12,58	28,48	12,58	
		27,52	11,94			
2		25,30	11,10	30,00	11,29	remblai superieur
		32,10	11,37	33,30	11,33	
		34,50	11,28	33,30	12,08	
		32,21	12,12	32,10	12,12	
		30,00	12,04	27,52	11,94	
		27,06	11,92	25,30	11,85	
		24,98	11,64	24,66	11,43	
		24,10	11,06			
3		5,80	2,52	14,49	2,45	remblai
		18,52	2,42	22,86	2,38	
		30,00	2,34	38,44	2,29	
		54,01	2,14	54,01	2,44	
		52,50	3,20	50,50	3,28	
		34,50	11,28	33,30	11,33	
		32,10	11,37	30,00	11,29	
		25,30	11,10	24,10	11,06	
		8,10	3,06	6,10	2,98	
		5,80	2,82			
4		60,00	1,20	60,00	2,40	Sable moyen
		58,17	2,41	54,70	2,44	
		54,01	2,44	54,01	2,14	
		38,44	2,29	30,00	2,34	
		22,86	2,38	18,52	2,42	
		14,49	2,45	5,80	2,52	
		5,80	2,82	0,00	2,87	
		0,00	1,67			
5		60,00	-3,50	60,00	1,20	encroutement
		0,00	1,67	0,00	-3,03	greso-calcaire
6		0,00	-3,03	0,00	-6,50	calcaire greseux
		60,00	-6,50	60,00	-3,50	

[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

Surcharge

N°	Surcharge		Type	Application	Placement	Origine	Longueur	Largeur	Inclin.	Intensité		
	nouv.	modif.			z [m]	x [m]	l [m]	b [m]	α [°]	q, q_1, f, F, x	q_2, z	unité
1	Non	Non	bande	constante	z = 12,58	x = 28,79	l = 2,45		0,00	60,00		kN/m2

Identification des surcharges

N°	Nom
1	charge

Eau

Type : Pas d'eau

Fissure de traction

La fissure de traction n'est pas saisie.

Séisme

Coefficient d'accélération horizontale : K_h = 0,0700
Coefficient d'accélération verticale : K_v = 0,0210

Paramètres du calcul de la phase

Situation de calcul : sismique

Résultats (Phase de construction 4)

Calcul 1 (phase 4)

Surface de glissement circulaire

Paramètres de la surface de glissement							
Centre :	x =	7,73	[m]	Angles :	α_1 =	0,63	[°]
	z =	36,83	[m]		α_2 =	44,10	[°]
Rayon :	R =	33,77	[m]				
Surface de glissement après l'optimisation.							

Le poids total du sol au-dessus de la surface de cisaillement: 1175,87 kN/m

Vérification de la stabilité de pente (Bishop)

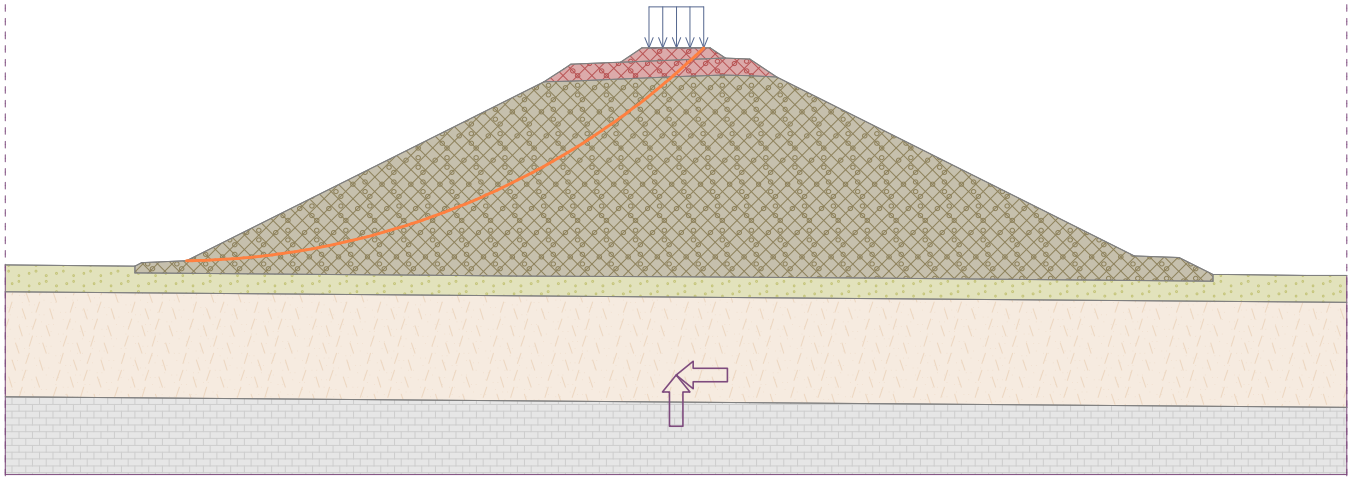
Somme des forces actives : F_a = 612,89 kN/m
Somme des forces passives : F_p = 813,99 kN/m

Moment de glissement : M_a = 20697,22 kNm/m
Moment résistant : M_p = 27488,61 kNm/m

Coefficient de sécurité = 1,33 > 1,00

Stabilité de la pente ADMISSIBLE

[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]



Calcul 2 (phase 4)

Surface de glissement circulaire

Paramètres de la surface de glissement							
Centre :	x =	50,92	[m]	Angles :	α_1 =	-45,66	[°]
	z =	34,17	[m]		α_2 =	-0,79	[°]
Rayon :	R =	30,89	[m]				
Surface de glissement après l'optimisation.							

Le poids total du sol au-dessus de la surface de cisaillement: 1022,42 kN/m

Vérification de la stabilité de pente (Bishop)

Somme des forces actives : F_a = 560,29 kN/m

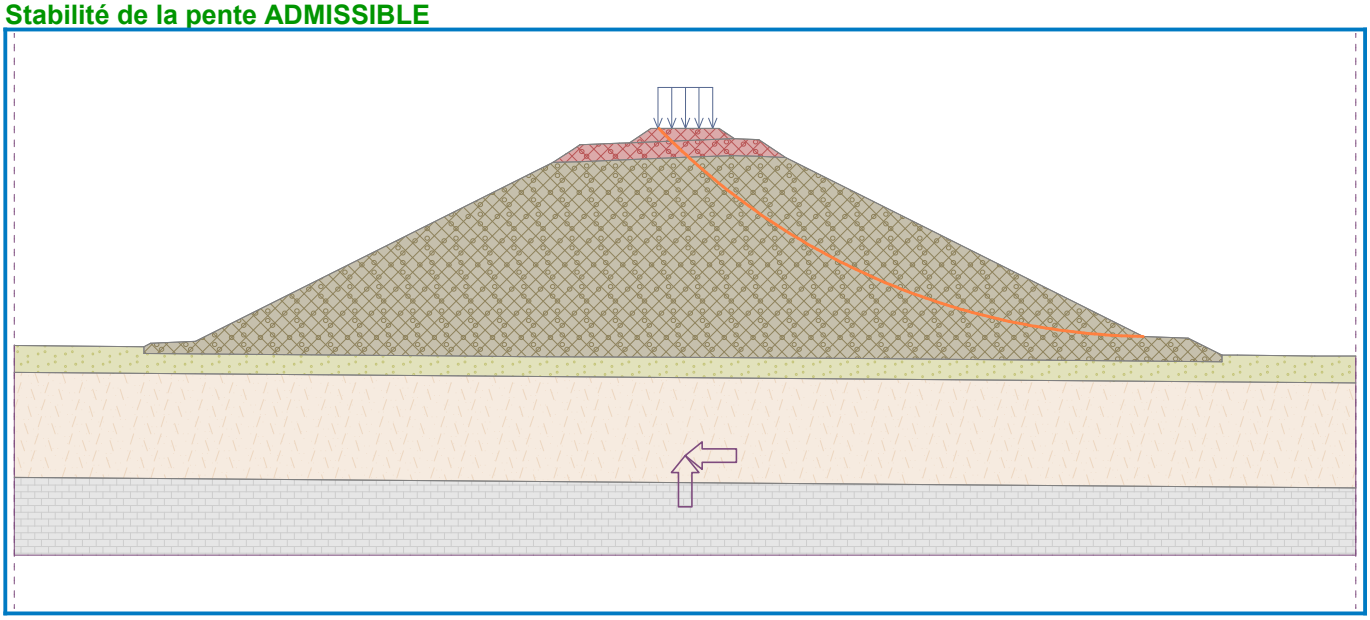
Somme des forces passives : F_p = 722,38 kN/m

Moment de glissement : M_a = 17307,51 kNm/m

Moment résistant : M_p = 22314,37 kNm/m

Coefficient de sécurité = 1,29 > 1,00

Stabilité de la pente ADMISSIBLE



[GEO5 - Stabilité des pentes (32 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]
[itech | +33 (0) 1 49 76 12 59| geo5@itech-soft.com| http://www.itech-soft.com]

ENSTP
Garidi, KOUBA
ALGER, ALGERIE

Calcul de la stabilité de pente

Données d'entrée (Phase de construction 1)

Projet

Date : 10/06/2025

Paramètres

Standard - coefficients de sécurité

Calcul de la stabilité

Méthode de vérification : coefficients de sécurité
Calcul du séisme : Standard

Coefficients de sécurité			
Situation de calcul permanente			
Coefficient de sécurité :	SF_s =	1,50	[–]

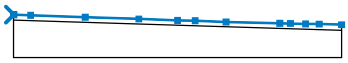
Coefficients de sécurité			
Situation de calcul au séisme			
Coefficient de sécurité :	SF_s =	1,00	[–]

Ancrages

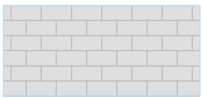
Méthode de vérification : coefficients de sécurité

Coefficients de sécurité			
Coefficient de sécurité à la rupture :	SF_t =	1,50	[–]
Coefficient de sécurité à l'arrachement du sol :	SF_e =	1,50	[–]
Coefficient de sécurité de la résistance à l'arrachement du coulis de ciment :	SF_c =	1,50	[–]

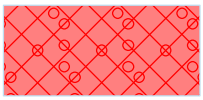
Interface

N°	Placement de l'interface	Coordonnées des points de l'interface [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		0,00	15,05	0,07	15,05	3,13	14,95
		13,13	14,60	22,91	14,27	30,00	14,00
		33,22	13,93	38,87	13,72	48,70	13,48
		50,62	13,44	53,41	13,37	55,88	13,33
		60,00	13,21				
2		0,00	14,05	60,00	12,21		

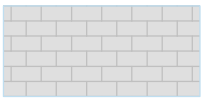
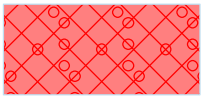
Paramètres des sols - état de contraintes effectives

N°	Nom	Echantillon	φ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	γ [kN/m³]
1	GRES TRES ALTERE		30,00	39,00	24,00
2	GRES CALCAIRE DUR		22,00	45,00	26,00

[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

N°	Nom	Echantillon	φ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	γ [kN/m³]
3	PARTIE SUPERIEUR		30,00	10,00	20,00

Paramètres des sols - soulèvement hydraulique

N°	Nom	Echantillon	γ_{sat} [kN/m³]	γ_s [kN/m³]	n [–]
1	GRES TRES ALTERE		24,00		
2	GRES CALCAIRE DUR		26,00		
3	PARTIE SUPERIEUR		20,00		

Paramètres des sols

GRES TRES ALTERE

Poids volumique :	γ = 24,00 kN/m³
État de contrainte :	effectives
Résistance au cisaillement :	Mohr-Coulomb
Angle de frottement interne :	φ_{ef} = 30,00 °
Cohésion du sol :	c_{ef} = 39,00 kPa
Poids volumique du sol saturé :	γ_{sat} = 24,00 kN/m³

GRES CALCAIRE DUR

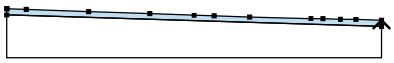
Poids volumique :	γ = 26,00 kN/m³
État de contrainte :	effectives
Résistance au cisaillement :	Mohr-Coulomb
Angle de frottement interne :	φ_{ef} = 22,00 °
Cohésion du sol :	c_{ef} = 45,00 kPa
Poids volumique du sol saturé :	γ_{sat} = 26,00 kN/m³

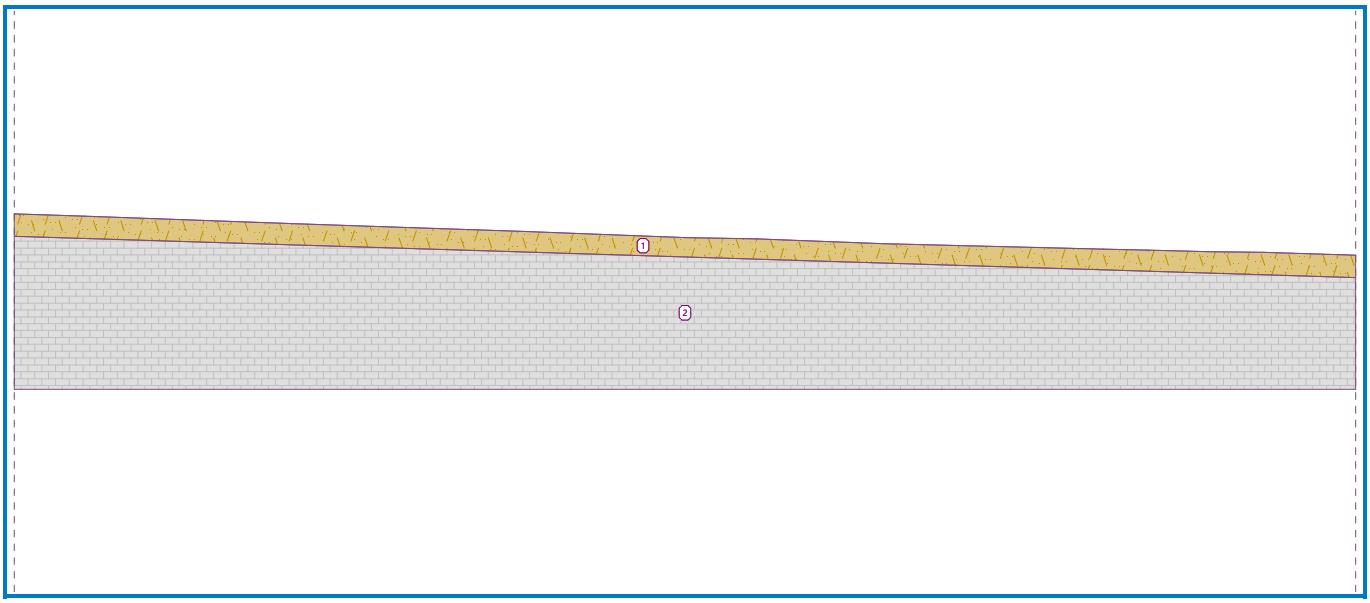
PARTIE SUPERIEUR

Poids volumique :	γ = 20,00 kN/m³
État de contrainte :	effectives
Résistance au cisaillement :	Mohr-Coulomb
Angle de frottement interne :	φ_{ef} = 30,00 °
Cohésion du sol :	c_{ef} = 10,00 kPa
Poids volumique du sol saturé :	γ_{sat} = 20,00 kN/m³

[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

Assignation et surfaces

N°	Placement de la surface	Coordonnées des points de la surface [m]				Sol assigné
		x	z	x	z	
1		60,00	12,21	60,00	13,21	GRES TRES ALTERE
		55,88	13,33	53,41	13,37	
		50,62	13,44	48,70	13,48	
		38,87	13,72	33,22	13,93	
		30,00	14,00	22,91	14,27	
		13,13	14,60	3,13	14,95	
		0,07	15,05	0,00	15,05	
		0,00	14,05			
2		0,00	14,05	0,00	7,21	GRES CALCAIRE DUR
		60,00	7,21	60,00	12,21	



Eau

Type : Pas d'eau

Fissure de traction

La fissure de traction n'est pas saisie.

Séisme

Le séisme n'est pas considéré.

Paramètres du calcul de la phase

Situation de calcul : permanente

Résultats (Phase de construction 1)

Calcul 1 (phase 1)

Surface de glissement circulaire

La surface de glissement n'est pas saisie

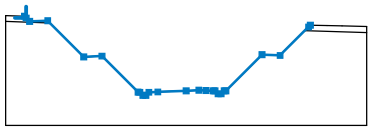
[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

Vérification de la stabilité de pente (Bishop)
Le calcul n'a pas été effectué.

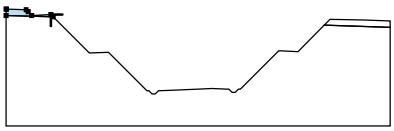
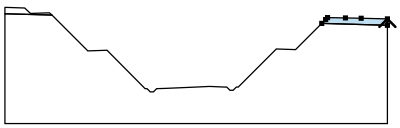
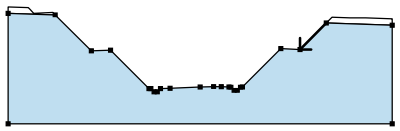
[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

Données d'entrée (Phase de construction 2)

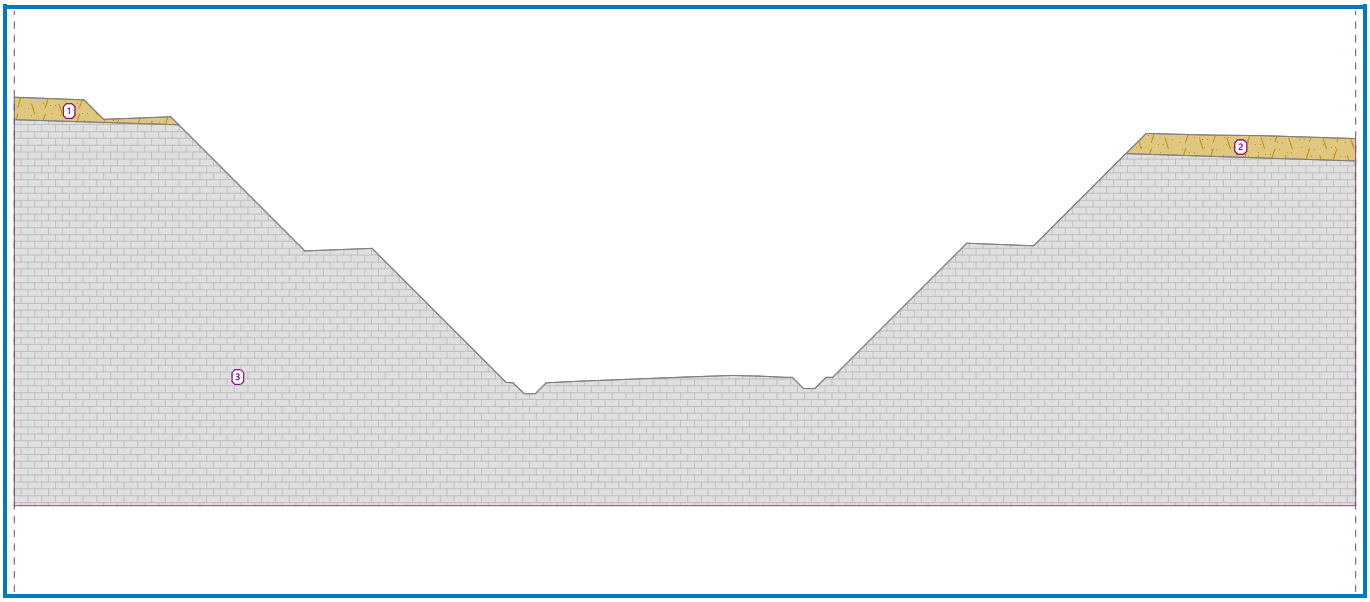
Déblai

N°	Placement du déblai	Coordonnées des points du déblai [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		3,12	14,94	3,43	14,63	4,00	14,06
		7,00	14,18	13,00	8,18	16,00	8,30
		22,00	2,30	22,30	2,29	22,80	1,79
		23,30	1,79	23,80	2,29	25,30	2,35
		30,00	2,54	32,10	2,62	33,30	2,58
		34,50	2,53	34,80	2,52	35,30	2,02
		35,80	2,02	36,30	2,52	36,60	2,53
		42,60	8,53	45,60	8,41	50,33	13,14
		50,62	13,44				

Assignation et surfaces

N°	Placement de la surface	Coordonnées des points de la surface [m]				Sol assigné
		x	z	x	z	
1		7,36	13,82	7,00	14,18	GRES TRES ALTERE
		4,00	14,06	3,43	14,63	
		3,12	14,94	0,07	15,05	
		0,00	15,05	0,00	14,05	
2		60,00	12,21	60,00	13,21	GRES TRES ALTERE
		55,88	13,33	53,41	13,37	
		50,62	13,44	50,33	13,14	
		49,72	12,53			
3		49,72	12,53	45,60	8,41	GRES CALCAIRE DUR
		42,60	8,53	36,60	2,53	
		36,30	2,52	35,80	2,02	
		35,30	2,02	34,80	2,52	
		34,50	2,53	33,30	2,58	
		32,10	2,62	30,00	2,54	
		25,30	2,35	23,80	2,29	
		23,30	1,79	22,80	1,79	
		22,30	2,29	22,00	2,30	
		16,00	8,30	13,00	8,18	
		7,36	13,82	0,00	14,05	
		0,00	-3,21	60,00	-3,21	
		60,00	12,21			

[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]



Eau

Type : Pas d'eau

Fissure de traction

La fissure de traction n'est pas saisie.

Séisme

Le séisme n'est pas considéré.

Paramètres du calcul de la phase

Situation de calcul : permanente

Résultats (Phase de construction 2)

Calcul 1 (phase 2)

Surface de glissement circulaire

Paramètres de la surface de glissement							
Centre :	x =	20,56	[m]	Angles :	α_1 =	-66,58	[°]
	z =	23,86	[m]		α_2 =	5,79	[°]
Rayon :	R =	22,18	[m]				
Surface de glissement après l'optimisation.							

Le poids total du sol au-dessus de la surface de cisaillement: 2849,52 kN/m

Vérification de la stabilité de pente (Bishop)

Somme des forces actives : F_a = 1269,37 kN/m
Somme des forces passives : F_p = 2312,51 kN/m

Moment de glissement : M_a = 28154,68 kNm/m
Moment résistant : M_p = 51291,38 kNm/m

Coefficient de sécurité = 1,82 > 1,50

Stabilité de la pente ADMISSIBLE

Calcul 2 (phase 2)

Surface de glissement circulaire

[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

Paramètres de la surface de glissement							
Centre :	x =	37,96	[m]	Angles :	α_1 =	-6,40	[°]
	z =	21,26	[m]		α_2 =	65,83	[°]
Rayon :	R =	19,36	[m]				
Surface de glissement après l'optimisation.							

Le poids total du sol au-dessus de la surface de cisaillement: 2269,29 kN/m

Vérification de la stabilité de pente (Bishop)

Somme des forces actives : F_a = 993,44 kN/m

Somme des forces passives : F_p = 1938,68 kN/m

Moment de glissement : M_a = 19232,91 kNm/m

Moment résistant : M_p = 37532,81 kNm/m

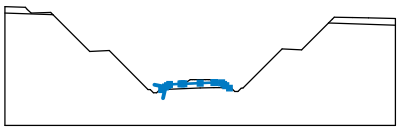
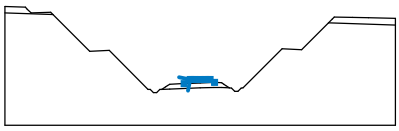
Coefficient de sécurité = 1,95 > 1,50

Stabilité de la pente ADMISSIBLE

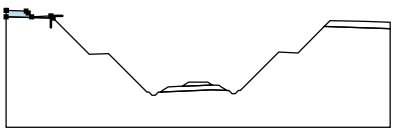
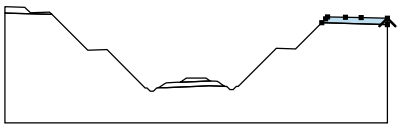
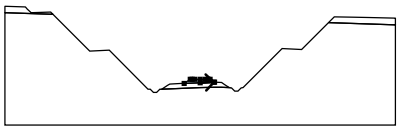
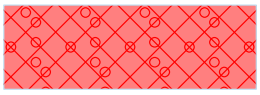
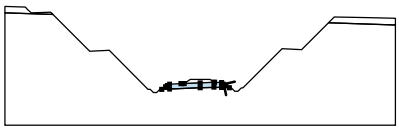
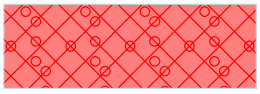
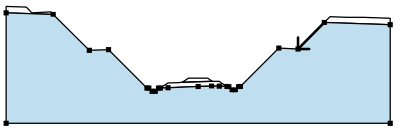
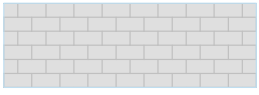
[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

Données d'entrée (Phase de construction 3)

Interface du remblai

N°	Placement de l'interface	Coordonnées des points de l'interface [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		24,09	2,31	24,66	2,68	24,98	2,89
		25,30	3,10	27,06	3,17	27,21	3,18
		27,52	3,19	30,00	3,29	32,10	3,37
		32,21	3,37	33,30	3,33	33,62	3,11
		33,94	2,90	34,50	2,53		
2		27,52	3,19	28,48	3,83	28,78	3,83
		29,18	3,83	30,00	3,83	30,79	3,83
		31,22	3,83	31,52	3,83	32,21	3,37

Assignation et surfaces

N°	Placement de la surface	Coordonnées des points de la surface [m]				Sol assigné
		x	z	x	z	
1		7,36	13,82	7,00	14,18	GRES TRES ALTERE 
		4,00	14,06	3,43	14,63	
		3,12	14,94	0,07	15,05	
		0,00	15,05	0,00	14,05	
2		60,00	12,21	60,00	13,21	GRES TRES ALTERE 
		55,88	13,33	53,41	13,37	
		50,62	13,44	50,33	13,14	
		49,72	12,53			
3		30,00	3,29	32,10	3,37	PARTIE SUPERIEUR 
		32,21	3,37	31,52	3,83	
		31,22	3,83	30,79	3,83	
		30,00	3,83	29,18	3,83	
		28,78	3,83	28,48	3,83	
		27,52	3,19			
4		33,94	2,90	33,62	3,11	PARTIE SUPERIEUR 
		33,30	3,33	32,21	3,37	
		32,10	3,37	30,00	3,29	
		27,52	3,19	27,21	3,18	
		27,06	3,17	25,30	3,10	
		24,98	2,89	24,66	2,68	
		24,09	2,31	25,30	2,35	
		30,00	2,54	32,10	2,62	
		33,30	2,58	34,50	2,53	
5		49,72	12,53	45,60	8,41	GRES CALCAIRE DUR 
		42,60	8,53	36,60	2,53	
		36,30	2,52	35,80	2,02	
		35,30	2,02	34,80	2,52	
		34,50	2,53	33,30	2,58	
		32,10	2,62	30,00	2,54	
		25,30	2,35	24,09	2,31	
		23,80	2,29	23,30	1,79	
		22,80	1,79	22,30	2,29	

[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

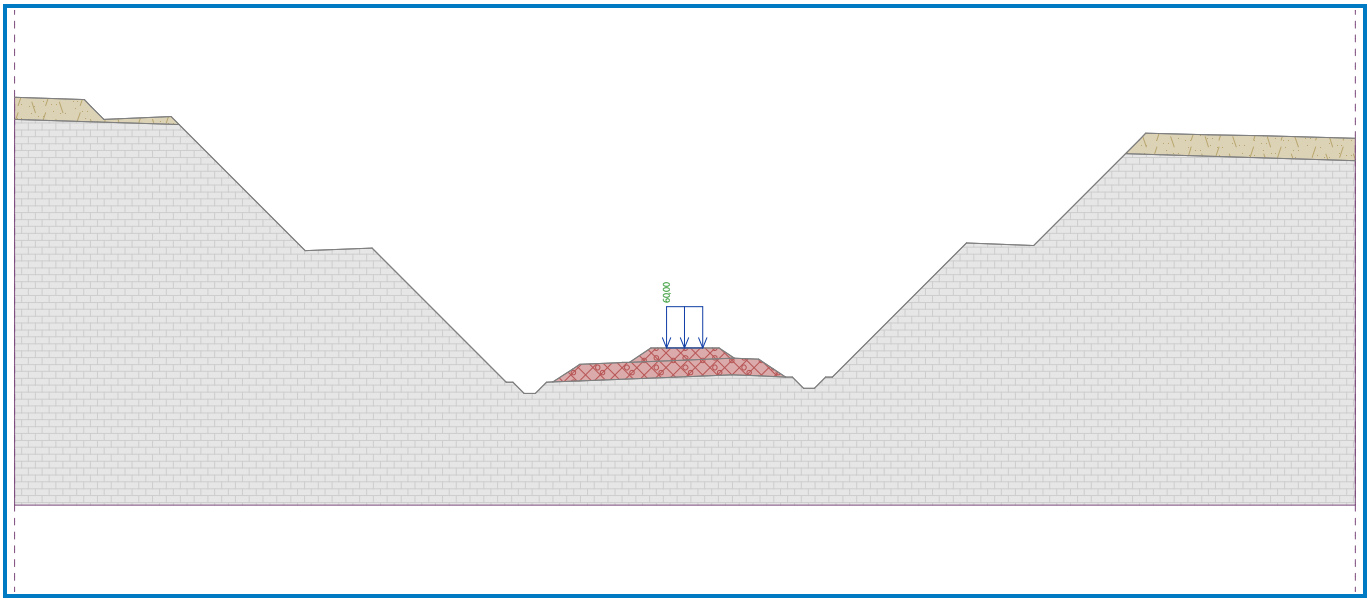
N°	Placement de la surface	Coordonnées des points de la surface [m]				Sol assigné
		x	z	x	z	
		22,00	2,30	16,00	8,30	
		13,00	8,18	7,36	13,82	
		0,00	14,05	0,00	-3,21	
		60,00	-3,21	60,00	12,21	

Surcharge

N°	Surcharge		Type	Application	Placement	Origine	Longueur	Largeur	Inclin.	Intensité		
	nouv.	modif.			z [m]	x [m]	l [m]	b [m]	α [°]	q, q_1, f, F, x	q_2, z	unité
1	Oui		bande	constante	z = 3,83	x = 29,18	l = 1,61		0,00	60,00		kN/m^2

Identification des surcharges

N°	Nom
1	CHARGE



Eau

Type : Pas d'eau

Fissure de traction

La fissure de traction n'est pas saisie.

Séisme

Le séisme n'est pas considéré.

Paramètres du calcul de la phase

Situation de calcul : permanente

Résultats (Phase de construction 3)

Calcul 1 (phase 3)

Surface de glissement circulaire

[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

Paramètres de la surface de glissement							
Centre :	x =	20,68	[m]	Angles :	α_1 =	-66,22	[°]
	z =	24,07	[m]		α_2 =	5,43	[°]
Rayon :	R =	22,38	[m]				
Surface de glissement après l'optimisation.							

Le poids total du sol au-dessus de la surface de cisaillement: 2830,52 kN/m

Vérification de la stabilité de pente (Bishop)

Somme des forces actives : F_a = 1264,26 kN/m

Somme des forces passives : F_p = 2303,03 kN/m

Moment de glissement : M_a = 28294,11 kNm/m

Moment résistant : M_p = 51541,87 kNm/m

Coefficient de sécurité = 1,82 > 1,50

Stabilité de la pente ADMISSIBLE

Calcul 2 (phase 3)

Surface de glissement circulaire

Paramètres de la surface de glissement							
Centre :	x =	37,77	[m]	Angles :	α_1 =	-5,88	[°]
	z =	21,13	[m]		α_2 =	66,07	[°]
Rayon :	R =	19,21	[m]				
Surface de glissement après l'optimisation.							

Le poids total du sol au-dessus de la surface de cisaillement: 2185,72 kN/m

Vérification de la stabilité de pente (Bishop)

Somme des forces actives : F_a = 969,14 kN/m

Somme des forces passives : F_p = 1891,70 kN/m

Moment de glissement : M_a = 18617,23 kNm/m

Moment résistant : M_p = 36339,49 kNm/m

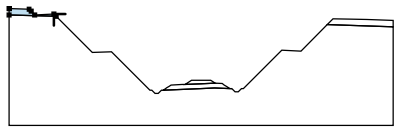
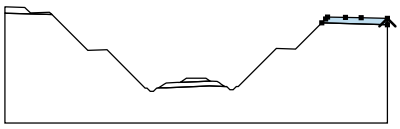
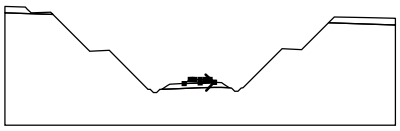
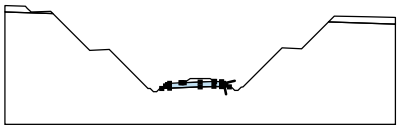
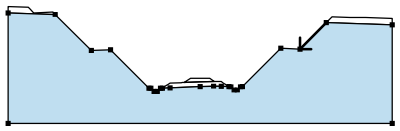
Coefficient de sécurité = 1,95 > 1,50

Stabilité de la pente ADMISSIBLE

[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

Données d'entrée (Phase de construction 4)

Assignation et surfaces

N°	Placement de la surface	Coordonnées des points de la surface [m]				Sol assigné
		x	z	x	z	
1		7,36	13,82	7,00	14,18	GRES TRES ALTERE
		4,00	14,06	3,43	14,63	
		3,12	14,94	0,07	15,05	
		0,00	15,05	0,00	14,05	
2		60,00	12,21	60,00	13,21	GRES TRES ALTERE
		55,88	13,33	53,41	13,37	
		50,62	13,44	50,33	13,14	
		49,72	12,53			
3		30,00	3,29	32,10	3,37	PARTIE SUPERIEUR
		32,21	3,37	31,52	3,83	
		31,22	3,83	30,79	3,83	
		30,00	3,83	29,18	3,83	
		28,78	3,83	28,48	3,83	
		27,52	3,19			
4		33,94	2,90	33,62	3,11	PARTIE SUPERIEUR
		33,30	3,33	32,21	3,37	
		32,10	3,37	30,00	3,29	
		27,52	3,19	27,21	3,18	
		27,06	3,17	25,30	3,10	
		24,98	2,89	24,66	2,68	
		24,09	2,31	25,30	2,35	
		30,00	2,54	32,10	2,62	
		33,30	2,58	34,50	2,53	
5		49,72	12,53	45,60	8,41	GRES CALCAIRE DUR
		42,60	8,53	36,60	2,53	
		36,30	2,52	35,80	2,02	
		35,30	2,02	34,80	2,52	
		34,50	2,53	33,30	2,58	
		32,10	2,62	30,00	2,54	
		25,30	2,35	24,09	2,31	
		23,80	2,29	23,30	1,79	
		22,80	1,79	22,30	2,29	
		22,00	2,30	16,00	8,30	
		13,00	8,18	7,36	13,82	
		0,00	14,05	0,00	-3,21	
		60,00	-3,21	60,00	12,21	

Surcharge

N°	Surcharge		Type	Application	Placement	Origine	Longueur	Largeur	Inclin.	Intensité		
	nouv.	modif.			z [m]	x [m]	l [m]	b [m]	α [°]	q, q_1, f, F, x	q_2, z	unité
1	Non	Non	bande	constante	z = 3,83	x = 29,18	l = 1,61		0,00	60,00		kN/m^2

[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

Identification des surcharges

N°	Nom
1	CHARGE

Eau

Type : Pas d'eau

Fissure de traction

La fissure de traction n'est pas saisie.

Séisme

Coefficient d'accélération horizontale : K_h = 0,0700
Coefficient d'accélération verticale : K_v = 0,0210

Paramètres du calcul de la phase

Situation de calcul : sismique

Résultats (Phase de construction 4)

Calcul 1 (phase 4)

Surface de glissement circulaire

Paramètres de la surface de glissement							
Centre :	x =	20,68	[m]	Angles :	α_1 =	-66,22	[°]
	z =	24,07	[m]		α_2 =	5,43	[°]
Rayon :	R =	22,38	[m]				
Surface de glissement après l'optimisation.							

Le poids total du sol au-dessus de la surface de cisaillement: 2830,52 kN/m
Vérification de la stabilité de pente (Bishop)
Somme des forces actives : F_a = 1381,52 kN/m
Somme des forces passives : F_p = 2246,08 kN/m

Moment de glissement : M_a = 30918,44 kNm/m
Moment résistant : M_p = 50267,20 kNm/m
Coefficient de sécurité = 1,63 > 1,00
Stabilité de la pente ADMISSIBLE

Calcul 2 (phase 4)

Surface de glissement circulaire

Paramètres de la surface de glissement							
Centre :	x =	37,78	[m]	Angles :	α_1 =	-5,30	[°]
	z =	23,36	[m]		α_2 =	62,02	[°]
Rayon :	R =	21,43	[m]				
Surface de glissement après l'optimisation.							

Le poids total du sol au-dessus de la surface de cisaillement: 2436,69 kN/m
Vérification de la stabilité de pente (Bishop)
Somme des forces actives : F_a = 1145,13 kN/m
Somme des forces passives : F_p = 1991,32 kN/m

Moment de glissement : M_a = 24540,23 kNm/m
Moment résistant : M_p = 42674,02 kNm/m
Coefficient de sécurité = 1,74 > 1,00

[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

Stabilité de la pente ADMISSIBLE

[GEO5 - Stabilité des pentes (64 bit) | version 5.2024.123.0 | clé de protection 31072 / 2 | SET Oran | Copyright © 2025 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.fr]

ANNEXE E : Classification des sols selon UIC

Classe de qualités des sols	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 sols0.2). 1.2 Roches très évolutives par exemple : - Craies de ρd <1.7t/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 ρd < 1.7 <t/m3 et de friabilité faible - Schistes non altérés. 1.5 Roches tendres par exemple : Si Microdeval 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 (Cu≤6). 2.3 Roches moyennement dures par exemple : Si 25<MDE≤40 et 30<LA<40.
QS3 : Bons sols	3.1 Sols comportant moins de 5% de fines 3.2 Roches dures par exemples : Si MDE≤25 et LA≤30

Annexe F : Les épaisseurs minimales de la couche d'assise

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

(e en mètres)

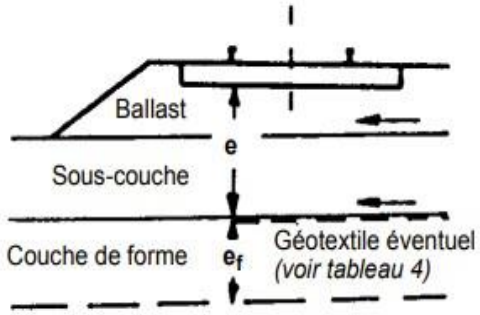


Fig. 9 - Calcul de l'épaisseur minimale "e" des couches d'assise

E	= 0,70 m	pour les plates-formes de classe de portance P1[a]
E	= 0,55 m	pour les plates-formes de classe de portance P2[a]
E	= 0,45 m	pour les plates-formes de classe de portance P3[a]
a	= 0	pour les groupes UIC 1 et 2 (ou lignes à V > 160 km/h, quel que soit le groupe UIC)[b]
a	= - 0,05 m	pour les groupes UIC 3 et 4[b]
a	= - 0,10 m	pour les groupes UIC 5 et 6[b]
b	= 0	pour les traverses bois de longueur 2,60 m
b	$= \frac{2,50 - L}{2}$	pour les traverses béton de longueur L (b en m, L en m, b peut être négatif si L > 2,50 m)
c	= 0	pour un dimensionnement normal
c	= - 0,10 m	à titre exceptionnel pour des opérations difficiles sur les lignes existantes de groupe UIC autres que "7, 8, 9 sans voyageur"[b]
d	= 0	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 200 kN
d	= + 0,05 m	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 225 kN
d	= + 0,12 m	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 250 kN
f	= 0	pour toutes les lignes parcourues à V ≤ 160 km/h et pour les plates-formes de portance P3 des lignes parcourues à grande vitesse[a]
f	= + 0,05 m	pour les plates-formes de classe de portance P2 des lignes parcourues à grande vitesse[a]
f	= + 0,10 m	pour les plates-formes de classe de portance P1 des lignes parcourues à grande vitesse[a]
g	= +	géotextile lorsque la couche de forme est en sol QS1 ou QS2[c]
g	= 0	(pas de géotextile) lorsque la couche de forme est en sol QS3[c]

a. Les classes de portance des plates-formes sont définies au tableau 4.
b. Les groupes UIC sont définis dans la fiche n° 714 (édition du 01.01.89) (v oir Bibliographie).
c. Les classes de qualité des sols sont définies au tableau 3.