République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المـــدرســـة الوطنيـــة العليـــا للأشغـال العموميـة
فرنسـيس جانســون

École Nationale Supérieure des Travaux Publics

Francis Jeanson

Mémoire

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

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Infrastructures de base

Thème

Étude en APD de la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique Béchar-Tindouf-Gara Djebilet du PK 618+000 au PK 639+000 avec la conception de la gare d'Oum El Assel

Présenté par :

M[lle] BRAIK Raounek

M[lle] BOUCHIREB Khawla

Encadré par :

M. BENINAL Abdelaziz

Mme SAADI Samira

Promotion 2024/2025

© ENSTP-FJ – Garidi – Vieux Kouba

ملخص:

يهدف هذا المشروع إلى إعداد دراسة مفصلة لمشروع خط سكك حديدية جديد مخصص لنقل المواد المعدنية، أحاديالسكة، يربط بين بشار، تندوف، وغار جبيلات. يبدأ المقطع المدروس من النقطة الكيلومترية 618+000 وينتهي عند النقطة 639+000، أي بطول إجمالي يقدر بـ 21 كلم. ويتضمن المشروع إنشاء محطة قطار في منطقة **أم العسل**.

تم إعداد هذا المشروع وفقًا للمعايير الدولية للاتحاد الدولي للسكك الحديدية(UIC) ، وتوصيات الشركة الوطنية للنقل بالسكك الحديدية الجزائرية. .(SNTF)

تم إنجاز النمذجة الهندسية للمسار باستخدام البرامج التالية**Civil 3D** :، **InfraWorks ،Geo5.0 ،Google Earth Pro ،**. **ArcGIS** و**Primavera P6 SketchUp, Twimotion** .

الكلمات المفتاحية :خط منجمي، سكة، عارضة، سكة حديدية، تحويلة، مصد، خط جانب .

Résumé :

Le présent projet concerne l'étude de l'Avant-Projet Détaillé (A.P.D) d'une nouvelle ligne ferroviaire à voie unique, destinée au transport de produits miniers, reliant les villes de Béchar, Tindouf vers Gara Djebilet. Le tronçon étudié s'étend du point kilométrique (PK) 618+000 au PK 639+000, sur une longueur totale de 21 km. Une gare mixte, dédiée au transport des voyageurs et des marchandises, est prévue au niveau de la localité d'Oum El Assel.

Le projet a été élaboré conformément aux normes internationales de l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) et aux recommandations techniques de la Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF).

La modélisation géométrique de la ligne a été réalisée à l'aide des logiciels suivants : **Civil 3D**, **InfraWorks**, **Geo5.0**, **SketchUp, Twimotion Google Earth Pro**, **Primavera P6**et **ArcGIS**.

Abstract:

This project focuses on the Detailed Preliminary Study (DPS) of a new single-track mining railway line connecting Béchar, Tindouf, and Gara Djebilet. The studied section begins at kilometer point (KP) 618+000 and ends at KP 639+000, covering a total distance of 21 km. A train station is planned at the Oum El Assel area.

The project has been developed in compliance with international UIC (International Union of Railways) standards and the technical recommendations of the Algerian National Railway Company (SNTF).

The geometric modeling of the project was carried out using the following software tools: **Civil 3D, InfraWorks, Geo5.0, Google Earth Pro, ArcGIS and Primavera P6 SketchUp, Twimotion.**

Keywords: Railroad track, mining line, sleeper, rail, turnout, buffer stop, clear siding.

Remerciement :

Nous exprimons, tout d'abord, nous exprimons notre gratitude envers Dieu pour le courage et la détermination qu'il nous a accordés pour achever ce travail.

Nos remerciements les plus sincères vont à nos familles et à nos parents, pour leur soutien indéfectible, leur confiance constante et leur présence bienveillante tout au long de ces années de formation et de persévérance.

*Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à **Monsieur A. BENINAL**, Directeur de chemin de fer au sein de **SAETI**, pour avoir accepté d'encadrer ce travail. Sa disponibilité, ses orientations méthodologiques rigoureuses ainsi que ses conseils techniques avisés ont été déterminants pour la réalisation de ce mémoire.*

*Nous remercions chaleureusement les équipes professionnelles de **COSIDER** et **GCB** pour leur accueil, leur collaboration active et la qualité des échanges partagés durant notre stage. Nous exprimons également notre gratitude à **Madame Meridji**, ingénieure chez **SETIRAL**.*

*Une reconnaissance toute particulière est adressée à **Madame LARBI Salma**, enseignante engagée et profondément humaine, dont le dévouement, l'écoute et la générosité ont été pour nous une véritable source de motivation. Ses encouragements sincères, en particulier dans les moments de doute, ont résonné comme un appui précieux qui a marqué durablement notre parcours.*

*Nos remerciements vont aussi à l'ensemble du corps enseignant de l'**ENSTP**, et en particulier à **Monsieur Morsli**, pour son accompagnement pédagogique et ses remarques pertinentes tout au long de notre formation.*

*Nous souhaitons également saluer le professionnalisme et l'engagement de l'équipe administrative de l'École, notamment **Madame MEKIDECHE**, Directrice de l'ENSTP, **Monsieur F. FEDGHOUCHE**, Directeur des études, **Madame M. MAHIAOUI**, Chef du Département Infrastructure de Base, ainsi que **Mesdames I. MAKOUDI, M. BOUREBIA**, pour leur soutien logistique et leur encadrement efficace.*

Nous remercions sincèrement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail et pour l'attention qu'ils y porteront.

Enfin, nous adressons nos pensées les plus reconnaissantes à tous ceux, proches ou collaborateurs, qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce projet. Leur appui, qu'il ait été moral, technique ou humain, a été précieux et profondément apprécié.

Dédicace

À ma douce maman, ***Samia,*** *mon roc silencieux, mon refuge dans les tempêtes. Ta tendresse inconditionnelle, ta patience, et ton amour discret m'ont accompagnée dans chaque pas. C'est en toi que j'ai puisé ma force, et c'est à toi que je dois cette persévérance qui m'a menée jusqu'ici.*

À mon père, ***Mohammed****, ce modèle de sagesse et de calme. Ta présence rassurante, tes silences pleins de sens et ton soutien constant m'ont guidée plus que tu ne l'imagines. Tu es ce regard bienveillant qui m'a toujours encouragée à aller plus loin.*

À mes sœurs, ***Nesrine et Narimène****, mes confidentes, mes éclats de joie dans les moments gris. Vos mots, vos attentions et votre affection ont toujours su apaiser mes doutes et ranimer ma motivation.*

À ***Yasser****, mon frère fidèle, et à* ***Amine****, mon beau-frère bienveillant : votre soutien discret, mais toujours juste, m'a portée plus d'une fois. Merci pour votre présence précieuse.*

À ***Raounek,*** *plus qu'une binôme, une véritable alliée, une sœur choisie. Ensemble, on a partagé bien plus qu'un travail : des doutes, des rires, des larmes parfois, mais surtout une complicité rare. Merci d'avoir été là dans chaque étape, avec ta générosité, ton écoute et ton indéfectible loyauté.*

À ***Meriem, Hana, Nawres, Imen, Nesrine, Randa, Maria, Manel, Safa, Sara*** *et* ***Bouchra*** *: vous avez été ma bouffée d'air, ma parenthèse de légèreté dans les moments d'épuisement. Merci pour votre présence sincère et vos encouragements spontanés.*

Je tiens à remercier ***Ilyas, Oussama*** *et* ***Aymen****, pour leur disponibilité, leur aide précieuse et leur soutien tout au long de ce parcours. Votre présence m'a grandement soulagée dans les moments clés.*

Et à mes petits cœurs : ***Anes, Iyad*** *et* ***Tesnim****, mes neveux et nièce adorés. Vos sourires, vos câlins, votre innocence m'ont rappelé la beauté des choses simples. Vous êtes une partie de mon moteur secret.*

À vous tous, je dédie ce mémoire. Il porte en lui un peu de chacun de vous, de votre affection, de votre soutien, et de votre lumière. Merci, du plus profond de mon cœur.

Et enfin, à ***l'ENSTP,*** *cette école qui m'a appris à penser avec rigueur, à persévérer malgré les doutes, et à me relever à chaque chute. Aujourd'hui, je suis fière d'en être issue, fière de porter le nom d'ingénieure formée entre ses murs.*

BOUCHIREB Khawla

Dédicace

À toi, ma mère, *Il n'y a pas de mot assez tendre, ni de phrase assez forte pour te dire à quel point je t'aime. Tu es mon souffle quand je suis à bout, ma lumière quand tout devient flou. C'est à travers tes silences pleins de prières, tes regards pleins d'amour, que j'ai puisé ma force. Je ne pourrai jamais te rendre tout ce que tu m'as donné, mais ce travail, cette réussite… c'est d'abord pour toi.*

À mon père, *Ce héros discret de mes jours. Tu ne disais pas beaucoup, mais dans chacun de tes gestes, il y avait un monde d'amour et de sacrifices. Merci d'avoir porté mes rêves comme si c'étaient les tiens. Je suis fière d'être votre enfant unique. Fière de vous offrir ce fruit de votre amour et de vos sacrifices.*

À ma famille, *À ma grand-mère que j'aime très fort, À mon oncle Salah qui m'a toujours soutenue, À mes tantes, et à mes cousines Noussa, Abir et Khaoula... Merci pour votre présence, vos mots, vos gestes.*

À Bouchireb Khawla, *Plus qu'une binôme… tu es ma vraie amie, celle qui a marché avec moi jusqu'au bout. On a tout partagé les idées, les nuits blanches, les rires, les doutes, même les larmes parfois. Tu m'as soutenue quand j'étais à bout, tu m'as écoutée, encouragée, portée Sans toi, ce chemin n'aurait jamais eu le même goût. Merci pour tout, du fond du cœur.*

Un grand merci aux ingénieurs ***Oussama Krouma****,* ***Akram Belhamra*** *et* ***Anis Manallah****. Merci pour votre disponibilité, vos conseils et votre aide ponctuelle tout au long de ce projet.*

À mes amies ***Randa, Wiam et Sarah*** *Merci d'avoir été là.*

À ***Madame Bourbia Mahdia,*** *Je ne trouverai jamais assez de mots pour vous remercier. Vous m'avez tenmdu la main avec humanité et beaucoup de cœur. Merci de m'avoir soutenue dans mes moments les plus difficiles.*

Et enfin, à mon école, ***l'ENSTP,*** *Ce lieu qui n'a pas seulement formé mon esprit, mais aussi mon cœur. J'y ai appris à tomber et à me relever, à douter, à créer, à aimer ce que je deviens. Je suis fière d'avoir été l'une des vôtres.*

Fière d'être une ingénieure de l'ENSTP.

BRAIK Raounek

Abréviation

A.P.D : Avant-Projet Détaillé.

ADV : Appareil De Voie.

ANESRIF : Agence Nationale d'Études et de Suivi de la Réalisation des Investissements Ferroviaires.

BV : Bassin versant.

ERTMS : Européen Railways Traffic Management System.

GF : Garage Franc

IDF : Intensité - Durée – Fréquence.

Lu : Longueur Utile.

ONM : Office National de la Météorologie.

PK : Point kilométrique.

PU : Puit de reconnaissance.

Qps : Débit pleine section.

RN : Route Nationale.

RPOA : Règlement Parasismique des Ouvrages d'Art.

SC : Sondage Carotté.

SNTF : Société Nationale des Transports Ferroviaires.

SP : Sondage pressiométriques.

SPT : Essai de Pénétration Standard.

UIC : Union Internationale des Chemins de

VBS : Essai bleu de méthylène.

Vmar : Vitesse marchandise.

ERTMS : Européen Rail Traffic Management System.

ETCS : Européen Train Control System.

Vps : Vitesse pleine section.

Vvoy : Vitesse voyageur.

LRS : Long rail soudé.fer.

EPIC : Établissement public à caractère industriel et commercial en Algérie.

BG : Compagnie Bône-Guelma.

EA : Compagnie de l'Est Algérien.

OA : Compagnie de l'Ouest Algérien.

CFA : Compagnie Franco-Algérienne.

PLMA : Compagnie des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée – Réseau d'Algérie

CFAE : Compagnie des chemins de fer algériens de l'État.

SNCF : Société nationale des chemins de fer.

OCFA : Office des chemins de fer algériens.

CCFA : Compagnie des chemins de fer français en Algérie

SNCFA : Société nationale des chemins de fer algériens.

SNTF : Société Nationale des Transports Ferroviaires.

SNERIF : Société Nationale d'Études et de Réalisation d'Infrastructures Ferroviaires.

SIF : Société d'Ingénierie Ferroviaire.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE : 1
CHAPITRE I. LES CHEMINS DE FER EN ALGÉRIE : 3
I.1 Introduction : 3
I.2 L'histoire de chemin de fer en Algérie : 3
I.2.1 Avant l'indépendance : 3
I.2.2 Après l'indépendance : 5
I.3 État actuel et perspectives de développement du réseau ferroviaire en Algérie : 5
I.4 Les avantages chemin de fer : 7
I.5 Conclusion : 8
CHAPITRE II. LA DÉGRADATION DU BALLAST DANS LES INFRASTRUCTURES FERROVIAIRES :. …. 9
II.1 Introduction : 9
II.2 Ballast : 9
II.3 Le rôle ballast : 10
II.4 Principaux processus de dégradation du ballast : 10
II.4.1 . Phénomènes de rupture et d'érosion granulaire : 10
II.4.2 Contamination par particules fines : 11
II.4.3 Influences environnementales et hydrologiques : 12
II.5 Techniques d'évaluation de l'état du ballast : 12
II.5.1 Méthodes de surveillance sur site : 12
II.5.2 Protocoles d'analyse en laboratoire : 13
II.6 Techniques d'entretien préventives et correctives : 13
II.6.1 Techniques de régénération du ballast : 13
II.6.2 Intégration de matériaux géosynthétiques : 14
II.6.3 Amélioration des systèmes de drainage : 15
II.7 Conclusion : 15
CHAPITRE III. PRÉSENTATION DU PROJET : 17
III.1 Introduction : 17
III.2 Ligne minière Ouest : 17
III.3 Présentation du projet étudie : 18
III.4 Objectif de projet : 18
III.5 Présentation du site : 19
III.5.1 Wilaya de Tindouf : 19
III.6 Caractéristiques du projet : 21

Sommaire

III.7 Conclusion : 22
CHAPITRE IV. SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE : 23
IV.1 Introduction : 23
IV.2 Le rail : 23
IV.3 Traverse : 24
IV.4 Attaches et semelles : 25
IV.5 Ballast : 25
IV.6 Les caténaires : 26
IV.7 Appareil de voie : 26
IV.7.1 Branchement simple : 26
IV.7.2 Les traversées jonctions : 27
IV.7.3 Les traversées Oblique : 27
IV.8 Organisation et phasage du chantier de pose de voie : 27
IV.8.1 Préparation logistique et topographique : 27
IV.8.2 Pose des traverses : 27
IV.8.3 Assemblage et fixation des rails : 27
IV.8.4 Ballastage et réglage de la voie : 28
IV.8.5 Libération des contraintes thermiques : 28
IV.9 Conclusion : 28
CHAPITRE V. LA GÉOMÉTRIE DE LA VOIE : 29
V.1 Introduction : 29
V.2 Trace En Plan : 29
V.2.1 Critères de limitation des paramètres de trace en plan : 29
V.2.2 Les conditions et les règles à respecter dans le trace en plan : 29
V.2.3 Les éléments du trace en plan : 30
- Les Alignements 30
- Arc de cercle 30
- Courbe de raccordement : 30

V.2.4 Les paramètres géométriques du trace : 30
V.2.5 Application au projet : 35
V.2.6 Les contraintes le long du tracé : 38
V.3 Profil en long : 39
V.3.1 Introduction : 39
V.3.2 Élément de profil en long : 39
V.3.3 Les raccordements : 40
V.3.4 Application sur le projet : 41

Sommaire

V.4 Conclusion : 41
CHAPITRE VI. ÉTUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE : 42
VI.1 Introduction : 42
VI.2 Méthodologie et critères de conception : 42
VI.3 Étude hydrologique : 42
VI.3.1 Présentation générale de la zone de projet : 42
VI.3.2 Caractéristique climatique et pluviométriques : 43
VI.3.3 Les caractéristiques morphologiques des bassins versants : 47
VI.3.4 Calcul des débits maximaux (Les crues) : 50
VI.4 Calcul hydraulique : 53
VI.4.1 Dimensionnent des ouvrages transversaux : 53
VI.4.2 Dimensionnent des ouvrages longitudinaux : 59
VI.5 Conclusion : 60
CHAPITRE VII. ÉTUDE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE : 61
VII.1 Introduction : 61
VII.2 Étude Géologique : 61
VII.2.1 Situation géographique : 61
VII.2.2 Formes géomorphologiques : 62
VII.2.3 Aperçu sismique : 62
VII.2.4 Cadre géologique général : 63
VII.2.5 Caractérisation Géologique du Secteur d'Étude : 64
VII.3 Étude géotechnique : 64
VII.3.1 Programme d'investigation géotechnique : 64
VII.4 Essais in situ : 67
VII.4.1 Méthodologie d'investigation : 67
VII.5 Essais de laboratoire 69
VII.6 Présentation des résultats : 70
VII.6.1 Sondages carottés : 70
VII.6.2 Puits de reconnaissance : 72
VII.6.3 SPT : 73
VII.6.4 Pénétromètre dynamique lourd : 73
VII.7 Zone d'emprunt : 74
VII.8 Synthèse des résultats : 75
VII.9 Conclusion : 76
CHAPITRE VIII. ASSISE FERROVIAIRE : 77

Sommaire

VIII.1 Introduction : 77
VIII.2 Structure d'assise ferroviaire : 77
VIII.3 Stratification de l'assise ferroviaire : 78
VIII.3.1 Couche de ballast : 78
VIII.3.2 Sous-couche : 78
VIII.3.3 Plate-forme : 79
VIII.4 Dimensionnement de la structure d'assise : 80
VIII.4.1 Calcul les épaisseurs minimales des couches de ballast et sous-ballast de pleine voie : 80
VIII.4.2 Structure d'assise retenue : 81
VIII.5 Conclusion : 81
CHAPITRE IX. PROFIL EN TRAVERS : 82
IX.1 Introduction : 82
IX.2 Les éléments du profil en travers : 82
IX.2.1 Les éléments de superstructure : 82
IX.2.2 Les éléments de l'infrastructure : 82
IX.2.3 Les éléments du talus : 82
IX.3 Profil en travers de notre projet d'étude : 82
IX.4 Calcul des cubatures : 83
IX.5 Conclusion : 83
CHAPITRE X.TERRASSEMENT ET OUVRAGE D'ART : 84
X.1 Introduction : 84
X.2 Les terrassements : 84
X.2.1 Objectifs et enjeux des terrassements : 84
X.2.2 Décapage : 85
X.2.3 Remblai : 85
X.2.4 Déblais : 85
X.2.5 Pente des talus en déblai et en remblai : 86
X.2.6 Étude de stabilité : 87
X.2.7 Protection des talus : 87
X.3 Les ouvrages : 88
X.3.1 Influence sur le choix des ouvrages : 88
X.3.2 Le croisement route-rail : 88
X.3.3 Les ouvrages d'art du projet : 89
X.4 Conclusion : 91

Sommaire

CHAPITRE XI. CONCEPTION DE LA GARE D'OUM ASSEL : 92

XI.1 Introduction : 92

XI.2 Type de gare : 92

XI.3 Étude de plan de masse d'une gare : 92

XI.4 Aménagement de la gare : 92

XI.4.1 Les installations d'une gare à voyageurs : 92

XI.4.2 Marge de glissement à l'aval des signaux : 93

XI.4.3 Garage franc GF : 94

XI.4.4 La longueur utile de la voie de stationnement Lu : 94

XI.4.5 Heurtoir : 95

XI.5 Les caractéristiques géométriques de la gare : 95

XI.5.1 La déclivité dans les gares : 95

XI.5.2 Quai : 95

XI.5.3 Les appareils de voie : 96

XI.6 Gare D'OUM ASSEL : 97

XI.6.1 Description de la gare : 97

XI.6.2 Les caractéristiques de la gare d'OUM EL ASSEL : 98

XI.6.3 Assainissement de la gare : 99

XI.7 Conclusion : 99

CHAPITRE XII. SIGNALISATION FERROVIAIRE : 100

XII.1 Introduction : 100

XII.2 Le rôle des installations de signalisation : 100

XII.3 Les risques ferroviaires : 100

XII.4 Fonctions des signaux : 101

XII.5 Implantation longitudinale : 101

XII.6 Types de signaux ferroviaires : 102

XII.7 Types de blocs : 102

XII.8 Principe de cantonnement : 102

XII.9 Système de signalisation moderne ERTMS : 103

XII.10 Application au projet : 104

XII.11 Conclusion : 104

CHAPITRE XIII. ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT : 105

XIII.1 Introduction : 105

XIII.2 Cadre juridique et réglementaire applicable : 105

Sommaire

XIII.3 Objectifs de l'étude d'impact environnemental : 106
XIII.4 Aperçu générale : 106
XIII.4.1 Situation géographique et administrative de la wilaya de Tindouf : 106
XIII.5 Analyse de l'état initiale de la zone d'étude : 107
XIII.6 L'impact du projet : 109
XIII.6.1 Impact négatifs et mesures d'atténuation proposées : 109
XIII.6.2 Les Impacts positifs : 111
XIII.7 Conclusion : 111
CHAPITRE XIV. ANALYSE DES RISQUES : 112
XIV.1.1 Introduction : 112
XIV.2 Les risques : 112
XIV.2.1 Phénomène d'ensablement : 112
XIV.2.2 Crues soudaines dans les oueds : 113
XIV.3 Risques techniques liés à la plateforme et à la structure de voie : 114
XIV.3.1 Dégradation du ballast par infiltration de fines : 114
XIV.3.2 Effet thermique et dilatation des rails : 114
XIV.4 Conclusion : 115
CHAPITRE XV. PLANIFICATION DU PROJET : 116
XV.1 Introduction : 116
XV.2 Importance de la planification dans les projets d'infrastructure : 116
XV.3 Planification avec Primavera P6 : 116
XV.3.1 Démarche adoptée : 116
XV.3.2 Phases principales planifiées : 116
XV.4 Diagramme Gantt et chemin critique : 117
XV.5 Conclusion : 117
CHAPITRE XVI. DEVIS ESTIMATIF ET QUANTITATIF 118
CONCLUSION GÉNÉRALE : 120

Liste des tableaux

Tableau III-1 : Caractéristiques du projet. 21
Tableau IV-1: Les caractéristiques de rail type UIC 60 E1. 24
Tableau V-1: valeurs admissibles de devers. 31
Tableau V-2: Valeur limites de l'insuffisance de devers. 32
Tableau V-3: Valeur limites de excès de dévers. 32
Tableau V-4: Limite de variation de l'insuffisance par rapport au temps. 33
Tableau V-5: Limite da la variation de divers. 33
Tableau V-6 : Les longueurs minimales des alignements et des pleines courbes. 34
Tableau V-7: Paramètres géométriques du tracé en plan. 35
Tableau V-8:Exemple de calculs pour R=2300m. 36
Tableau V-9:Tableau récapitulatif des éléments de tracé en plan. 37
Tableau V-10 : contraintes du tracé. 38
Tableau V-11: Les déclivités maximales. 39
Tableau V-12: Longueurs minimales des déclivités. 40
Tableau V-13: valeurs de A_v pour une vitesse de 220km/h. 40
Tableau V-14: valeurs de R_v. 40
Tableau V-15:Paramètres géométriques de profil en long (SNTF). 41
Tableau VI-1: Température en C° mesurées à Tindouf pour la période (1992-2020). 44
Tableau VI-2:Pluies journaliers maximales fréquentielles (mm). 45
Tableau VI-3:Précipitation journalière maximale au niveau de la station de Tindouf dans la période (1992-2022). 45
Tableau VI-4 : Les précipitations mensuelles et saisonnières. 46
Tableau VI-5 : Précipitations annuelles moyennes (mm). 46
Tableau VI-6: Les valeurs des paramètres de Montana pour les différentes périodes de retour. 47
Tableau VI-7: Valeur des intensités pour les différentes périodes de retour, en mm/h à la station pluviométrique de TINDOUF. 47
Tableau VI-8 : Caractéristiques morphométriques des bassins versants. 49
Tableau VI-9 : Les débits maximaux centennaux des oueds. 52
Tableau VI-10 : Calculs récapitulatifs des ouvrages busés de notre projet Vérifications des conditions d'auto-curage. 55
Tableau VI-11 : Tableau récapitulatif des dimensions des dalots avec les vérifications des conditions d'auto-curage. 58
Tableau VI-12: Les caractéristiques du remblai et déblai. 59
Tableau VI-13:Les dimensions du fossé. 60
Tableau VII-1 :Programme géotechnique des sections en déblai. 65
Tableau VII-2 : Programme géotechnique des sections en remblai. 66
Tableau VII-3: Programme géotechnique pour les ouvrages d'art et bâtiment. 67
Tableau VII-4 : Essais de laboratoire réalisés, normes applicables et paramètres déterminés. ... 69
Tableau VII-5 : Résultats des sondages carottés effectués sur le tronçon d'étude. 70
Tableau VII-6 : Lithologie de la zone d'étude. 71
Tableau VII-7 : Synthèse des résultats géotechniques sur les puits de reconnaissances. 72
Tableau VII-8 : Pénétration standard (SPT). 73
Tableau VII-9 : Résultats pénétromètre dynamique lourd. 74
Tableau VIII-1 : La classe la portance de la plate-forme. 80
Tableau VIII-2: Structure de la voie. 81
Tableau IX-1 : Les cubatures de terrassement et les couches d'assises. 83
Tableau X-1: les caractéristiques du sol en place. 87

Liste des tableaux

Tableau X-2: Résultats du calcul de stabilité pour le remblai. 87
Tableau X-3 : Liste de rétablissement routier. 89
Tableau X-4: Liste des lignes électriques à franchir. 90
Tableau X-5: Liste Ligne des fibres optique à franchir. 90
Tableau X-6: Liste Conduites AEP et Conduites EU à franchir. 90
Tableau XI-1: La longueur de la marge de glissement LG. 94
Tableau XI-2 : Les caractéristiques du quai. 95
Tableau XI-3 : Longueur de l'appareil de voie. 96
Tableau XI-4: Règles d'implantation des appareils de voie. 97
Tableau XI-5 : Caractéristiques de la gare d'OUM EL ASSEL. 98
Tableau XIII-1 Références législatives et réglementaires encadrant la gestion environnementale. 105
Tableau XIII-2 : Situation administrative de la wilaya de Tindouf 106
Tableau XIII-3 : Milieu physique. 107
Tableau XIII-4 : Milieu biologique. 108
Tableau XIII-5 : Milieu humain. 108
Tableau XIII-6 : Analyse des impacts négatifs du projet et propositions de mesures correctives. 109
Tableau XIII-7 : Analyse des impacts positifs du projet. 111
Tableau XVI-1 : Devis estimatif et quantitatif. 118

Liste des figures

Figure I-1 : Carte de chemin de fer en Algérie avant 1962 4
Figure I-2:Plan de développement des chemins de fer en Algérie. 7
Figure II-1: Ballast ferroviaire neuf. 9
Figure II-2: Fuseau granulométrique du ballast. 10
Figure II-3 : Mécanismes de dégradation du ballast. 11
Figure II-4 : Contamination avec les particules fines. 12
Figure II-5 : Principe de radar GPR. 13
Figure II-6 : Simulation de radar pénétration de sol ‘’Ballast ‘’. 13
Figure II-7 : Ballast dégradé. 14
Figure II-8 : Machine de criblage du ballast. 14
Figure II-9 : Installation d'une géogrille sous le ballast (Source: Geofabrics). 14
Figure III-1 : Ligne minière Ouest. 17
Figure III-2 : Photo illustrative du projet étudié sur Google Earth Pro. 18
Figure III-3: Carte de situation de la 19
Figure III-4: Carte des altitudes de la 19
Figure III-5: Diagramme Ombrothermique de Bagnols et Gaussen de la région De TINDOUF (période : 1992 - 2022). 20
Figure III-6: Carte de zonage sismique en Algérie. 21
Figure IV-1 : Rail type Vignole. 23
Figure IV-2 : Rail profile UIC 60 E1 24
Figure IV-3 : Traverse monobloc en BP. 24
Figure IV-4: Composition de l'attache Vossloh. 25
Figure IV-5: Composition de l'attache Vossloh (Autocad). 25
Figure IV-6 : caténaires (AutocCad). **26**
Figure IV-7: Caténaire. 26
Figure IV-8: Schéma illustratif d’un appareil de voie. 27
Figure IV-9 : Traversée-jonction simple/ double. 27
Figure IV-10 : Traversée- oblique ordinaire / combinée. 27
Figure V-1: Éléments constitutifs de l'axe en plan. 30
Figure V-2: devers installer pour une voie en courbe. 30
Figure V-3: les éléments de trace en plan. 35
Figure VI-1 : Carte des bassins versants de l’Algérie et découpage en sous-bassins du bassin versant saharien (bassin n°13). 43
Figure VI-2 Carte climatique de l'Algérie. 43
Figure VI-3:variation des températures mensuelle en C°. 44
Figure VI-4:Température moyenne annuelle de la station de Tindouf source ONM. 44
Figure VI-5:Ajustement des pluies journalières maximales. 45
Figure VI-6 : Variation des précipitations moyennes mensuelles et saisonnières. 46
Figure VI-7:courbe intensité-durée-Fréquence (IDF). 47
Figure VI-8: Schéma de principe d’un bassin versant. 48
Figure VI-9 : Exemple de délimitation de deux bassins versants de notre tracé sur (InfraWorks). 48
Figure VI-10: schéma d'une buse. 54
Figure VI-11: schéma d'un dalot. 56
Figure VI-12 : Le faussée trapézoïdal de notre projet 60
Figure VII-1: Situation administrative pour notre tracé d’étude. 61
Figure VII-2 : Carte géologique des formes géomorphologiques. 62
Figure VII-3 : Carte de zonage sismique selonRPA 2024. 63
Figure VII-4 : Carte géologique de notre zone d’étude. 63
Figure VII-5 : Carte géologique (source ASGA-Echelle 1/2100000ème). 64
Figure VII-6 : Sondage carroté F59 622+775 71

Liste des figures

Figure VII-7: Sondage carotté F63 639+500. 71
Figure VIII-1 : Structure des couches de l'assise ferroviaire. 78
Figure X-1: Passage à niveau (Infraworks). 88
Figure X-2: Passage inferieur (Infraworks). 89
Figure X-3: Illustration du passage supérieur sur Infraworks. 89
Figure XI-1: Les installations d'une gare à voyageurs. 93
Figure XI-2: Schématisation de la marge de glissement. 93
Figure XI-3: Schéma du garage franc. 94
Figure XI-4 : Schéma illustratif de la longueur utile. 95
Figure XI-5: Heurtoir. 95
Figure XI-6:la hauteur du quai et la distance par rapport à l'axe de la voie. 96
Figure XI-7: Schéma illustratif. 97
Figure XI-8 : Schéma de la gare Oum El Assel. 98
Figure XI-9: Ouvrage de drainage 99
Figure XII-1 : principe de système de cantonnement. 103
Figure XIV-1 : Disposition protection contre l'ensablement : haies naturelles et rideaux arborés(Autocad). 112
Figure XIV-2 : Disposition protection contre l'ensablement : filets brise-vent et de murs anti-sable. 113
Figure XIV-3 : Stabilisation des berges par enrochements de type rip-rap (Autocad). 114
Figure XIV-4 : Joint de dilatation pour la compensation thermique des rails. 115
Figure XV-1 : Représentation du diagramme de Gantt. 117

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Le chemin de fer en Algérie joue un rôle très important dans le développement du pays, aussi bien sur le plan économique que pour relier les différentes régions. Ce réseau, hérité de la période coloniale, a été amélioré au fil des années pour répondre aux besoins actuels en transport et en logistique. Son extension vers les régions intérieures et les zones proches des frontières montre la volonté de l'État d'utiliser les ressources du pays de façon utile et de mieux relier les zones éloignées au reste du territoire.

Dans ce cadre, une nouvelle ligne ferroviaire a été prévue pour relier la mine de Gara Djebilet, située dans la wilaya de Tindouf, aux zones industrielles du nord-ouest du pays. Cette ligne a pour but de transporter le minerai de fer vers des usines de transformation ou vers des ports pour l'exportation. C'est un projet important qui permet de créer de l'emploi, de faire avancer l'économie locale et de désenclaver une région éloignée.

La réalisation de cette ligne est suivie par l'Agence Nationale d'Étude et de Suivi de la Réalisation des Investissements Ferroviaires (ANESRIF), qui s'occupe des études, du suivi et du contrôle des travaux. Ce mémoire porte sur l'étude d'un tronçon de cette ligne, allant du Point Kilométrique (PK) 618+000 au PK 639+000, sur un linéaire de 21 kilomètres, avec la conception de la gare d'Oum El Assel, entre le PK 639+000 et le PK 642+100.

Le contenu de ce mémoire est réparti en plusieurs chapitres, chacun traitant d'un aspect essentiel du projet. Voici les principaux axes développés :

- **Une introduction générale à la voie ferrée**, afin de présenter ses composants, son rôle et son importance dans le transport terrestre.
- **Une recherche bibliographique sur la dégradation du ballast**, qui constitue un enjeu technique majeur dans la durabilité des infrastructures ferroviaires.
- **Une présentation du projet**, précisant le contexte, les objectifs, et les caractéristiques du tronçon étudié.
- **La description technique de la superstructure de la voie**, comprenant les rails, traverses, attaches et ballast.
- **L'étude de la géométrie de la voie**, avec un rappel des bases théoriques, suivi de l'application au tracé réel du projet.
- **Les études spécifiques à l'environnement du tracé :** étude hydraulique et hydrologique (écoulements d'eau), étude géologique (nature des terrains) et étude géotechnique (capacité portante des sols).
- **La conception de la gare d'Oum El Assel**, située à l'aval du tronçon, incluant les équipements nécessaires à son fonctionnement.
- **L'étude du système de signalisation**, assurant la sécurité et la régulation du trafic ferroviaire sur la ligne.
- **L'évaluation des impacts environnementaux du projet**, ainsi qu'une **analyse des risques** pouvant affecter sa réalisation ou son exploitation.

- **L'établissement du devis quantitatif et estimatif**, avec une **planification prévisionnelle des travaux** et des besoins en ressources.

La modélisation et les calculs ont été réalisés à l'aide de logiciels spécialisés, notamment Civil 3D, InfraWorks, ArcGIS, Geo5, AutoCAD, Google Earth Pro, SketchUp, Twimotion et Primavera P6 permettant une intégration cohérente des données géotechniques, topographiques et de conception ferroviaire.

Ce mémoire illustre la mise en application des acquis théoriques et pratiques dans un contexte réel d'ingénierie, tout en consolidant nos compétences en conception de tracés ferroviaires, analyse de terrain, gestion de projet et usage de technologies numériques avancées. Il représente une étape décisive dans notre parcours de formation, en lien direct avec les enjeux actuels d'aménagement du territoire et de mobilité durable.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE I. LES CHEMINS DE FER EN ALGÉRIE :

I.1 Introduction :

La performance des infrastructures de transport constitue un indicateur déterminant du niveau de développement économique d'un pays. En ce sens, le réseau ferroviaire se présente comme un vecteur stratégique de mobilité, en raison de sa capacité à assurer le transport massif de marchandises et de voyageurs sur de longues distances avec une efficacité logistique, énergétique et environnementale supérieure à celle des modes routiers.

En Algérie, le chemin de fer joue un rôle central dans l'optimisation des flux économiques, en soutenant les chaînes d'approvisionnement nationales et internationales, notamment dans les secteurs industriels, miniers et portuaires. Grâce à sa fiabilité opérationnelle, sa compétitivité en matière de coûts de transport et sa faible empreinte écologique, le rail constitue une solution d'aménagement structurant, capable de répondre aux exigences de durabilité, de décongestion urbaine et d'équilibre territorial.

I.2 L'histoire de chemin de fer en Algérie :

I.2.1 Avant l'indépendance :

- **1857-1878 (Période coloniale) :**

L'histoire de chemin de fer l'Algérie débute officiellement le 8 avril 1857, par un décret impérial autorisant la création de 1 357 km de voies ferrées. L'objectif principal est d'établir un maillage structurant autour de trois centres d'administration coloniale : Alger, Oran et Constantine. Le réseau est conçu à des fins militaires, économiques et logistiques, notamment pour l'acheminement des matières premières vers les ports d'exportation.

La première ligne opérationnelle, Alger–Blida, est ouverte le 8 septembre 1862, traversant la plaine de la Mitidja. D'autres lignes comme Oran–Saint-Denis-du-Sig ou Philippeville–Constantine sont entamées mais suspendues faute de financements.

Face aux contraintes budgétaires, l'administration coloniale confie la réalisation des infrastructures à plusieurs compagnies privées concessionnaires :

- Compagnie Bône-Guelma (BG)
- Compagnie de l'Est Algérien (EA)
- Compagnie de l'Ouest Algérien (OA)
- Compagnie Franco-Algérienne (CFA)
- Compagnie des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée – Réseau d'Algérie (PLMA)

Ces compagnies assurent la construction des voies, la pose des voies, la réalisation des ouvrages d'art ainsi que l'exploitation du trafic ferroviaire. En 1876, les premiers trains de nuit apparaissent, marquant une évolution vers un service de transport plus confortable. À la fin de cette première phase (1878), le réseau atteint 1 365 km.

- **1879–1906 (extension du réseau) :**

Une deuxième vague d'investissement est lancée le 18 juillet 1879 par l'État français, visant à ajouter 1 747 km de lignes d'intérêt général. En parallèle, les lignes d'intérêt local – destinées à desservir les zones agricoles, minières ou d'accès difficile – sont laissées à la charge des collectivités territoriales et des investisseurs privés.

Entre 1879 et 1906, 2 035 km sont ainsi ajoutés au réseau ferroviaire algérien. L'ossature du réseau est renforcée, avec une meilleure couverture des Hauts Plateaux, des zones minières (notamment autour de Bône, Tébessa), et de l'intérieur du pays.

Toutefois, à la fin de cette période, plusieurs compagnies privées concessionnaires rencontrent de graves difficultés financières. Ces instabilités entraînent une crise de gestion qui marque la fin du modèle concessionnaire privé. Ainsi, la CFA perd sa concession en 1900, suivie par la BG en 1905, puis par la EA en 1906. Cette série de faillites fragilise le fonctionnement global du réseau, et ouvre la voie à une reprise progressive du système ferroviaire par l'État.

- **1906–1946 (structuration étatique) :**

En 1912, l'État français crée la Compagnie des chemins de fer algériens de l'État (CFAE) pour reprendre la gestion des lignes abandonnées par les compagnies privées. Seule la Paris-Lyon-Méditerranée en Algérie (PLMA) continue d'exister sous forme de filiale locale du PLM.

Une nouvelle campagne d'investissements entre 1907 et 1946 permet d'ajouter 1 614 km de voies supplémentaires. Le réseau atteint alors près de 5 000 km.

En 1921, les lignes sont réparties entre la CFAE et la PLMA. Cette co-gestion prend fin en 1938 avec la nationalisation des lignes d'intérêt général au sein de la Société nationale des chemins de fer français (SNCF). À partir du 1er janvier 1939, l'exploitation est confiée à l'Office des chemins de fer algériens (OCFA).

- **Situation du réseau avant 1962 :**

À la veille de l'indépendance, le réseau ferroviaire algérien est techniquement avancé. Il comprend :

- Des trains de nuit équipés de voitures-lits.
- Des rames rapides de jour en inox (style Mistral).
- Une généralisation de la traction diesel, contrairement à la SNCF métropolitaine qui utilise encore des locomotives à vapeur.

Le réseau comporte plusieurs types d'écartement de voie (normal, métrique, étroit), ce qui limite son interopérabilité. Néanmoins, il reste l'une des principales infrastructures de transport du pays.

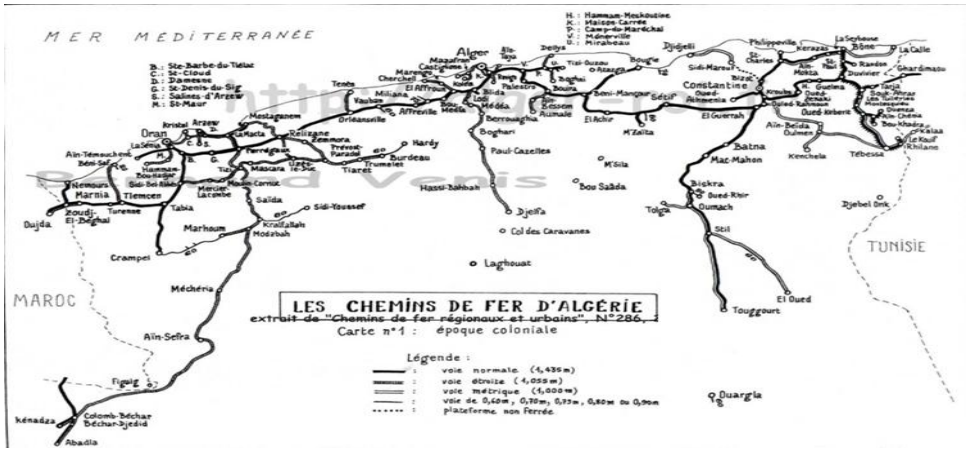


Figure I-1 : Carte de chemin de fer en Algérie avant 1962[1]

[1]**https://s2.qwant.com/thumbr/474x311/f/0/1cba43f600c7de981e6b730913dd43413ecf25c20782e6efeac0447f8322b1/th.jpg?u=https%3A%2F%2Ftse.mm.bing.net%2Fth%3Fid%3DOIP.sXXxcBNHN1IDqO5BdmaZ8gHaE3%26pid%3DApi&q=0&b=1&p=0&a=0**

I.2.2 Après l'indépendance :

- **1963–1975 (Nationalisation et transition) :**

Après l'indépendance en 1962, la Compagnie des chemins de fer français en Algérie (CCFA) est nationalisée et devient le 16 mai 1963 la Société nationale des chemins de fer algériens (SNCFA). L'Algérie conserve une grande partie du matériel roulant français, tout en introduisant de nouveaux équipements achetés auprès du bloc soviétique.

En 1975, le projet ambitieux du Trans-Maghreb reliant Casablanca, Oran, Alger et Tunis est lancé avec des rames inox modernes. Ce projet est rapidement abandonné à cause de tensions politiques régionales.

- **1976–1990 (Restructuration et investissements) :**

À l'expiration de la concession française en 1976, la SNCFA est dissoute et remplacée par trois entités :

- SNTF (exploitation ferroviaire).
- SNERIF (réalisation des infrastructures).
- SIF (ingénierie ferroviaire).

Un programme d'envergure est engagé : Construction de 203 km de nouvelles lignes, doublement de 200 km sur la rocade nord et renouvellement de 1 400 km de voie et ballast.

Mais à cause de la crise économique de 1986 entraîne la dissolution de la SNERIF et de la SIF. La SNTF reprend l'ensemble des prérogatives et devient un EPIC en 1990

À la fin des années 1990, le réseau algérien tombe à 3 500 km, soit environ 30 % de moins qu'en 1945. La vétusté du matériel et l'absence de construction de nouvelles lignes pendant deux décennies affectent la sécurité et la performance du transport ferroviaire

- **Modernisation et relance (2000–présent) :**

Depuis le début des années 2000, l'Algérie relance le développement de son réseau ferroviaire à travers l'ANESRIF, une agence dédiée à l'étude et au suivi des grands projets ferroviaires. Le réseau atteint 6 300 km en 2022, avec un objectif de 15 000 km à l'horizon 2030.

I.3 État actuel et perspectives de développement du réseau ferroviaire en Algérie :

nord constitue l'axe ferroviaire principal longeant le littoral algérien sur 1250 km, dont 572 km de dessertes régionales. Elle relie 22 wilayas, de Annaba à Tlemcen, et intègre 216 gares et haltes. En assurant la connexion de 9 ports majeurs, elle renforce considérablement les échanges logistiques Nord–Sud. Par ailleurs, 433 km de lignes supplémentaires sont en cours de réalisation pour étendre cette couverture stratégique.

- **La rocade des Hauts-Plateaux :**

S'étendant sur 1162 km entre Tébessa et Sidi Bel Abbès, la rocade des Hauts-Plateaux dessert 11 wilayas et intègre 56 gares et haltes. Il s'agit d'un axe moderne reliant les centres intérieurs du pays. À ce jour, 944 km sont opérationnels, tandis que 218 km sont en construction, notamment le tronçon Tissemsilt–Frenda via Tiaret. Le raccordement Relizane–Tiaret viendra parachever cet ensemble dans le réseau nord.

- **La ligne minière Est :**

Longue de 422 km, cette ligne stratégique assure le transport des minerais entre Djebel el-Onk et le port d'Annaba, traversant 5 wilayas. Elle comprend 30 haltes et gares. Actuellement, 297 km font l'objet d'un doublement et de travaux de modernisation. Un complément de 152 km est en phase préparatoire pour renforcer la capacité logistique vers l'est algérien.

- **La ligne minière Ouest :**

D'une longueur de 1650 km, cette ligne vise à connecter le port d'Oran aux gisements de Gara Djebilet à Tindouf. Le tronçon Oran–Béchar (700 km) est déjà en service après modernisation et intégration de systèmes de signalisation et de télécommunication. La seconde phase, en cours de développement, couvre 950 km entre Béchar, Tindouf et Gara Djebilet, traversant cinq wilayas et incluant 12 gares et haltes.

- **Boucle Sud-Est :**

Projetée sur 425 km, cette boucle reliera les villes du centre et de l'est saharien, de Laghouat à Touggourt. En desservant cinq wilayas, elle vise à intégrer les localités sahariennes au réseau ferroviaire national. Les études techniques et de faisabilité sont actuellement en cours.

- **Boucle Sud-Ouest :**

Avec un tracé de 1500 km, cette boucle ferroviaire doit connecter les villes oasis du Sud-Ouest, de Ghardaïa à Béchar. Elle prévoit également une extension vers Bordj Badji Mokhtar, via Adrar, sur 800 km supplémentaires. Ce corridor vise à structurer la mobilité régionale dans cinq wilayas sahariennes à fort potentiel.

- **Pénétrante Centre :**

L'axe transsaharien central Alger–Tamanrasset s'étend sur 2039 km, traversant 10 wilayas. Il est conçu pour permettre des vitesses jusqu'à 220 km/h. Le tronçon Boughezoul–Laghouat est déjà mis en service. Globalement, 250 km sont opérationnels, 639 km ont été étudiés et 1050 km sont en phase d'étude pour compléter cet axe structurant.

- **La pénétrante Est :**

Cette ligne de 418 km relie les ports de Skikda et Djendjen au complexe pétrolier de Hassi Messaoud. Le tronçon El Gourzi–Touggourt (264 km) est en service, équipé de systèmes modernes de signalisation. Les 154 km restants sont en construction et permettront aux trains de circuler à 220 km/h. Le parcours traverse 7 wilayas et comprend 54 haltes et gares.

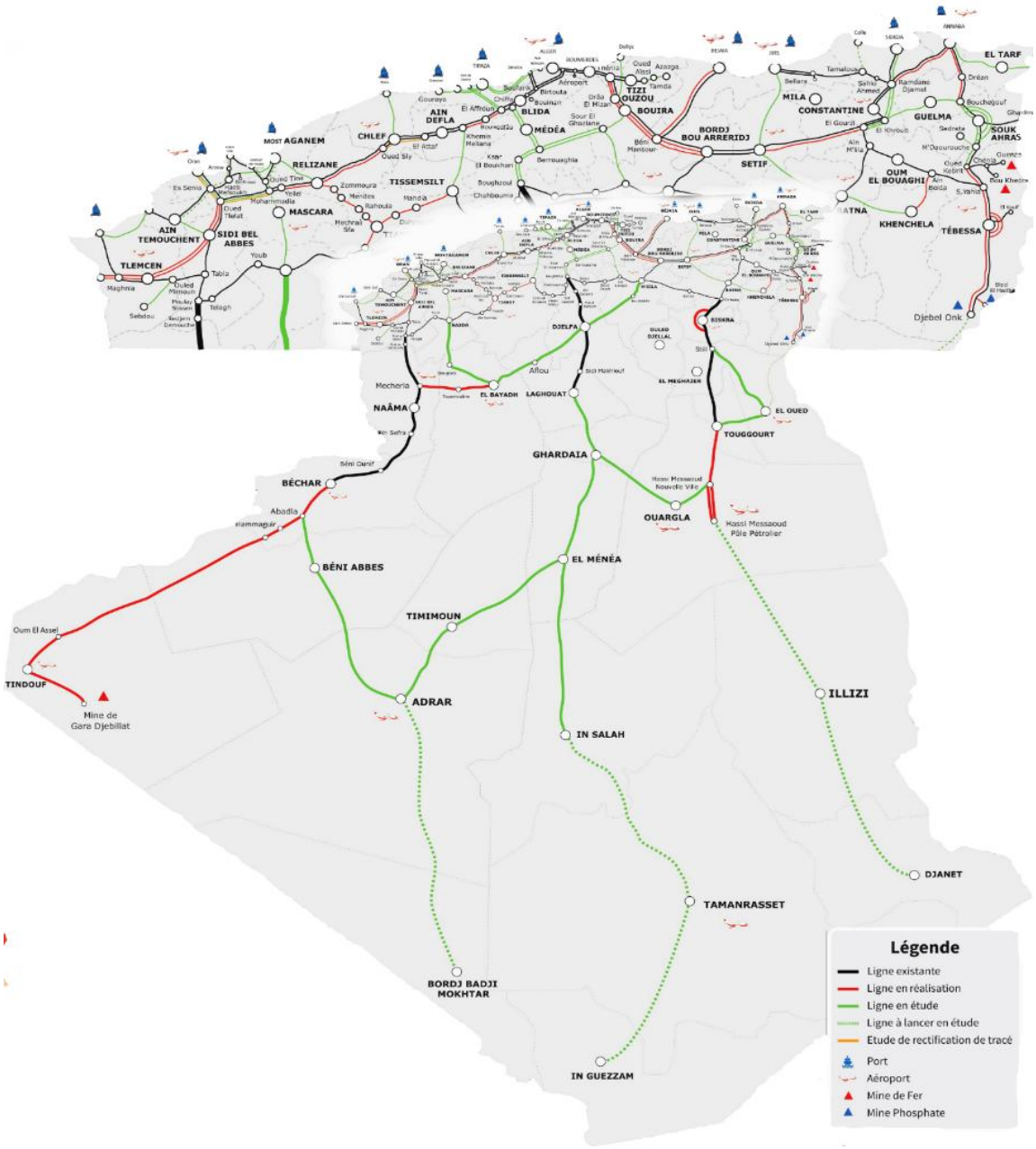


Figure I-2:Plan de développement des chemins de fer en Algérie.[2]

I.4 Les avantages chemin de fer :

- L'utilisation du train permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre en privilégiant une énergie largement décarbonée.
- Il se distingue par une efficacité énergétique remarquable, consommant en moyenne trois fois moins d'énergie que le transport routier pour une charge équivalente.
- Sa faible emprise au sol permet une optimisation de l'aménagement du territoire et une préservation accrue des terres agricoles.
- Grâce à un système de guidage sur voie fixe, le rail assure un haut niveau de sécurité, en limitant fortement les risques d'accidents liés à l'erreur humaine ou aux conditions de circulation.

https://www.anesrif.dz/images/Carte%20RFN%20Op.jpg[2]

- En tant que mode de transport collectif structurant, il participe à la décongestion des axes routiers, notamment en zones urbaines à forte densité.
- En matière de fret, un seul wagon peut remplacer jusqu'à une trentaine de camions, ce qui permet une rationalisation logistique et une diminution des coûts externes.
- la route, ce qui améliore par conséquent la qualité de vie.
- Il augmente l'attractivité des régions en simplifiant les échanges économiques et l'accès à l'emploi.
- Son infrastructure dédiée et son exploitation planifiée garantissent une régularité de service, avec des vitesses commerciales compétitives et une fiabilité accrue des temps de parcours.

I.5 Conclusion :

L'Algérie s'inscrit aujourd'hui dans une dynamique ambitieuse de modernisation et d'expansion de son réseau ferroviaire, pour objectif de devenir un acteur majeur du transport ferroviaire en Afrique. Grâce à des investissements soutenus, une planification stratégique et l'adoption de technologies modernes, le pays renforce la performance, la sécurité et la durabilité de ses infrastructures ferroviaires. Cette transformation structurelle s'intègre pleinement dans une vision de mobilité verte et de développement équilibré, consolidant le rail comme un pilier de la compétitivité économique et de la cohésion territoriale à l'échelle nationale et régionale.

CHAPITRE II

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE II. LA DÉGRADATION DU BALLAST DANS LES INFRASTRUCTURES FERROVIAIRES :

II.1 Introduction :

Dans le cadre de l'optimisation des infrastructures ferroviaires, le ballast constitue un élément critique dont la performance conditionne directement la stabilité, la sécurité et la durabilité de la voie ferrée. Toutefois, ce matériau granulaire est soumis à des contraintes mécaniques et environnementales qui altèrent progressivement ses propriétés fonctionnelles. Ce chapitre présente une synthèse bibliographique des connaissances techniques actuelles relatives à la dégradation du ballast. Il aborde successivement ses fonctions fondamentales, ses caractéristiques physico-mécaniques, les mécanismes de détérioration identifiés dans la littérature, ainsi que les méthodes d'évaluation de son état et les solutions de maintenance adoptées pour en prolonger la durée de service.

II.2 Ballast :

Le ballast est constitué exclusivement d'éléments provenant du concassage de roches massives d'origine naturelle, extraites en carrière. Il doit satisfaire à un ensemble d'exigences strictes portant sur la granulométrie, la forme des grains et leur résistance mécanique.



Figure II-1: Ballast ferroviaire neuf.[3]

Le ballast doit présenter une forme anguleuse sans aucune surface arrondie, garantissant ainsi un bon emboîtement entre les grains. Cette géométrie angulaire, associée à un coefficient d'aplatissement faible, favorise un comportement mécanique optimal grâce à un frottement intergranulaire efficace.

La granulométrie standard du ballast se situe généralement dans une plage comprise entre 25 mm et 50mm. Cette distribution granulométrique doit se conformer aux spécifications techniques définies par les normes en vigueur, telles qu'illustrées par le fuseau représenté dans la figure ci-dessus :

[3] **https://www.holcimpartner.ch/fr/produits/granulats/ballast-ferroviaire**

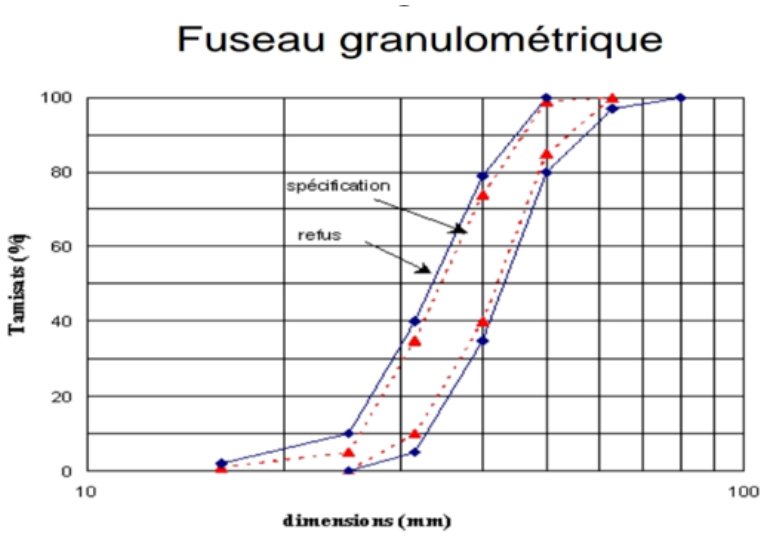


Figure II-2: Fuseau granulométrique du ballast.[4]

Le ballast est constitué de roches dures, résistantes à l'abrasion, telles que le granite ou la rhyolite. Sa résistance à l'usure est évaluée au moyen de l'essai Micro-Deval, tandis que sa résistance à la fragmentation est déterminée par l'essai Los Angeles.

II.3 Le rôle ballast :

Il remplit plusieurs fonctions essentielles dans la structure ferroviaire :

- Assure la stabilité verticale des traverses et le maintien du nivellement de la voie.
- Résiste aux efforts transversaux pour empêcher le déplacement latéral des rails.
- S'oppose aux efforts longitudinaux afin de maintenir l'écartement et compenser les effets de la dilatation thermique.
- Permet une répartition uniforme des charges du trafic vers la plateforme tout en assurant un comportement élastique de la voie.
- Facilite le drainage des eaux, limitant les risques de stagnation, de gel et de dégradation hydraulique.
- Atténue les vibrations et réduit les nuisances sonores, contribuant au confort et à la sécurité des usagers.

II.4 Principaux processus de dégradation du ballast :

II.4.1 . Phénomènes de rupture et d'érosion granulaire :

Le ballast est soumis à des pressions cycliques intenses dues au passage répété des trains, pouvant atteindre plusieurs centaines de mégapascals au niveau des points de contact entre les grains. Cette sollicitation engendre deux types de dégradations distinctes :

- **La fragmentation des grains**, correspondant à leur rupture sous l'effet des charges.
- **L'attrition**, qui désigne l'usure progressive des surfaces de contact entre les éléments.

Ces altérations modifient la composition du ballast en augmentant la proportion d'éléments fins et en arrondissant les arêtes tranchantes des pierres, ce qui réduit leur capacité à s'imbriquer correctement.

[4] **Microsoft PowerPoint - Présentation CFMS - L Schmitt.ppt [page :18]**

Les expériences en laboratoire menées par **Lackenby et al. (2007)** montrent que jusqu'à 10% de la masse totale du ballast peut être affectée après un million de cycles de chargement. L'intensité de cette dégradation dépend de plusieurs facteurs [1]:

- Le poids des trains (de 17 à 25 tonnes par essieu sur les lignes classiques, jusqu'à 35 tonnes pour le fret lourd).
- La fréquence des passages (pouvant dépasser 20 millions de cycles en dix ans sur les lignes très fréquentées).
- Les caractéristiques des roches utilisées (le granite et le basalte résistent généralement mieux que les calcaires ou les grès).

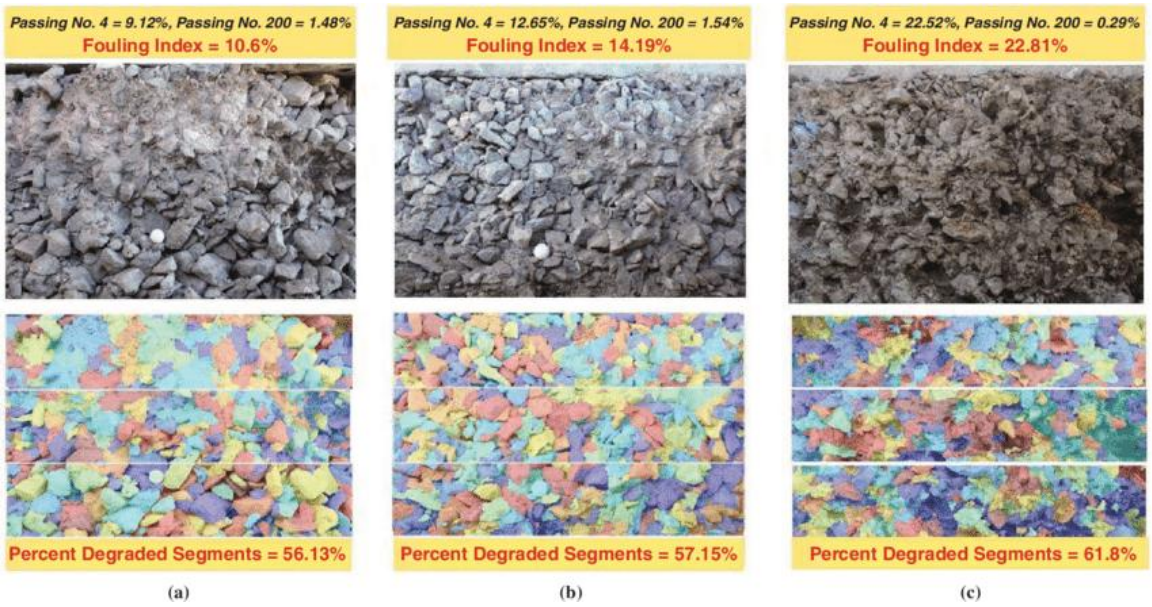


Figure II-3 : Mécanismes de dégradation du ballast.[5]

II.4.2 Contamination par particules fines :

La pollution du ballast par des éléments fins provient de plusieurs sources :

- La dégradation des pierres elles-mêmes (30-50% des fines).
- L'apport de particules extérieures comme les poussières et les débris végétaux (15-25%).
- L'usure des rails, des traverses et des semelles élastiques (25-35%).

Cette accumulation progressive réduit considérablement la capacité de drainage du ballast, perturbant l'évacuation de l'eau.

Les travaux de recherche **Schmitt (2014)** chiffrent cette évolution : la perméabilité d'un ballast neuf, initialement supérieure à 10^{-2} m/s, peut chuter à moins de 10^{-5} m/s après 15 ans d'utilisation sur une ligne moyennement fréquentée. Les conséquences directes comprennent [2] :

- Une augmentation des déformations sous charge (jusqu'à 40% plus importantes pour un ballast très pollué).
- Une diminution de l'angle de frottement interne (de 45° à moins de 35°).
- Une réduction de la résistance au cisaillement.

[5]**https://www.researchgate.net/figure/Progressively-degraded-ballast-samples-top-photos-were-analyzed-by-ballast-imaging_fig4_314201887**

- Une amplification des effets dynamiques lors du passage des trains.

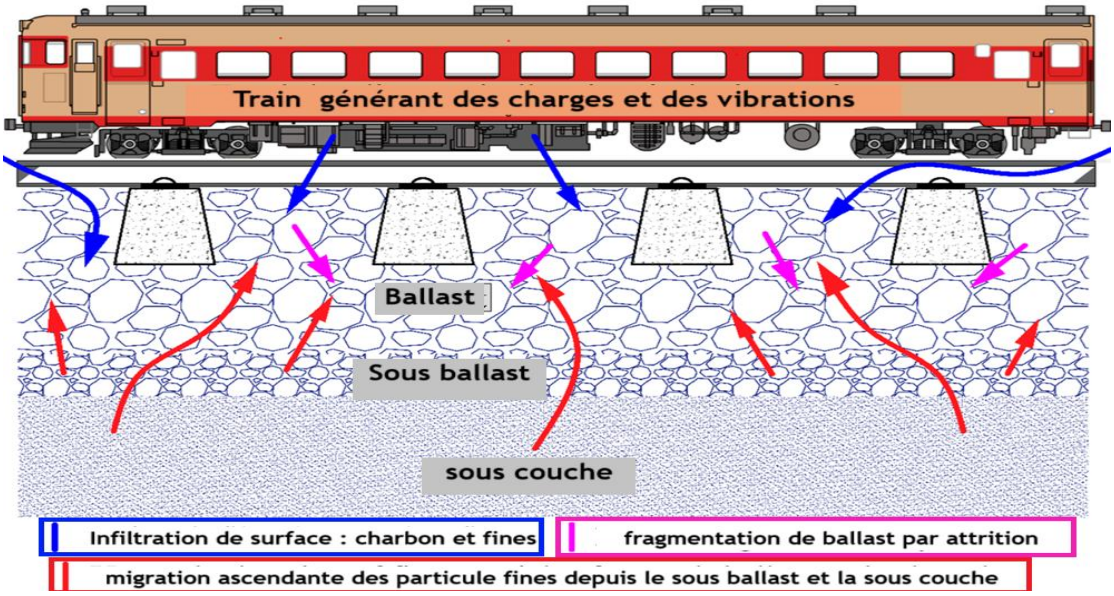


Figure II-4 : Contamination avec les particules fines.[6]

II.4.3 Influences environnementales et hydrologiques :

Les variations climatiques affectent fortement l'état du ballast. Les cycles de gel-dégel, fréquents dans les régions froides, provoquent des expansions et contractions répétées qui fragilisent la structure des pierres. **Selon Audley et Andrews (2013)**, après 25 cycles de gel-dégel, certains types de ballast peuvent perdre jusqu'à 15% de leur résistance initiale [3].

De même, un mauvais drainage peut causer la stagnation d'eau dans le ballast, accélérant sa dégradation chimique et mécanique. Les études de **Trinh et al. (2012)** mettent en évidence plusieurs problèmes associés [4] :

- L'eau agit comme lubrifiant entre les pierres, réduisant la stabilité latérale des voies.
- Des surpressions se créent lors du passage des trains.
- Les réactions chimiques d'altération s'accélèrent, surtout pour les ballasts d'origine sédimentaire.
- Les cycles d'humidification-séchage fragilisent progressivement les pierres.

II.5 Techniques d'évaluation de l'état du ballast :

II.5.1 Méthodes de surveillance sur site :

Les avancées technologiques ont permis de développer des outils d'inspection non-destructifs comme le radar géologique (GPR). Cette technologie, qui utilise la réflexion d'ondes électromagnétiques, permet d'identifier les zones problématiques caractérisées par une humidité excessive ou un encrassement avancé sans perturber le trafic ferroviaire **(De Bold et al , 2015)**. Les fréquences généralement utilisées (entre 400 MHz et 2 GHz) offrent une précision de l'ordre du centimètre et une profondeur d'analyse adaptée à l'épaisseur du ballast [5].

D'autres techniques complémentaires incluent:

- L'analyse des vibrations par accéléromètres, qui détecte les changements dans le comportement dynamique du ballast.

[6] images (225×225)

- La thermographie infrarouge, qui révèle les problèmes de drainage par les différences de température.

Les systèmes optiques embarqués qui permettent une inspection visuelle automatisée de la surface du ballast.

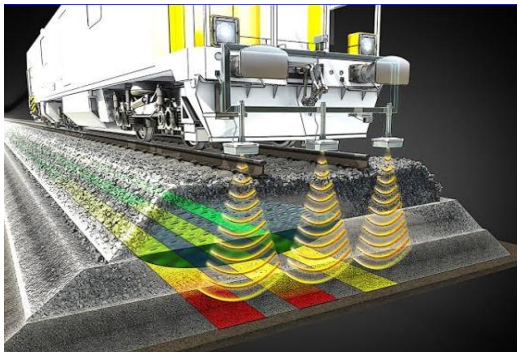


Figure II-5 : Principe de radar GPR.[7]

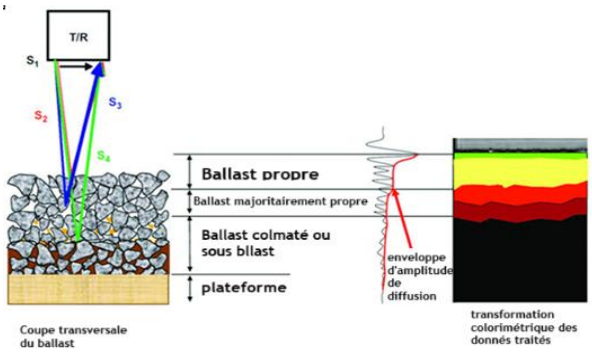


Figure II-6 : Simulation de radar pénétration de sol ‘’Ballast ‘’. [8]

Ces diagnostics précis permettent de mieux planifier les interventions de maintenance. Les travaux de **Berggren (2010)** sur le réseau suédois montrent que l'utilisation systématique du GPR a permis de réduire de 22% les coûts de renouvellement du ballast [6].

II.5.2 Protocoles d'analyse en laboratoire :

L'évaluation des propriétés mécaniques du ballast s'appuie sur des tests standardisés :

- L'essai Los Angeles **(norme NF EN 1097-2)** évalue la résistance des pierres à la fragmentation par impact et frottement. Les valeurs acceptables sont généralement inférieures à 20% pour les lignes à grande vitesse.
- Le test Micro-Deval **(norme NF EN 1097-1)** mesure leur résistance à l'usure par frottement en milieu humide, avec des seuils d'acceptabilité entre 15% et 25% selon le type de ligne.
- Les tests de perméabilité **(norme NF EN 13450)** mesurent la capacité de drainage du matériau.
- D'autres tests plus spécifiques, comme la résistance au gel-dégel **(NF EN 1367-1)** ou l'évaluation de la forme des pierres **(NF EN 933-4)**, permettent d'affiner l'analyse des matériaux.

II.6 Techniques d’entretien préventives et correctives :

II.6.1 Techniques de régénération du ballast :

Le criblage mécanique est l'intervention la plus courante pour restaurer les propriétés du ballast dégradé (figure II-7). Réalisée avec des machines (figure II-8 spécialisées capables de traiter jusqu'à 800 mètres de voie par jour, cette opération permet d'extraire les particules fines accumulées à travers un système de tamis vibrants, rétablissant ainsi la perméabilité et la stabilité de la couche sans nécessiter un remplacement complet **(Esveld, 2001).** [7]

Les recherches de **Paderno (2010)** montrent que cette technique peut prolonger la durée de vie du ballast de 15 à 20 ans, à condition que le taux de fines ne dépasse pas 30% de la masse totale

[7] **csm__40566_GroundControl_Img_01_Postpro_00000_bf5adfd5c6.jpg (1140×798)**
[8] **Importance of geotechnical diagnosis in railway management: A review [page : 11]**

avant l'intervention. Au-delà de ce seuil, l'efficacité du criblage diminue fortement et un renouvellement complet devient plus économique. [8]



Figure II-7 : Ballast dégradé.[9]



Figure II-8 : Machine de criblage du ballast.[10]

II.6.2 Intégration de matériaux géosynthétiques :

L'intégration de structures géosynthétiques dans la structure ferroviaire améliore significativement la performance du ballast. Selon **Indraratna et al. (2013),** ces matériaux techniques peuvent réduire les déformations permanentes de 40% à 65% et prolonger de 30% la durée de service de l'infrastructure [9]. Plusieurs types sont utilisés :

- Les géotextiles filtrants (non-tissés de 200 à 1000 g/m²), placés entre le ballast et la sous-couche, empêchent la migration des fines tout en maintenant la perméabilité.
- Les géogrilles de renforcement (avec des ouvertures typiquement entre 30 et 65 mm), insérées dans le premier tiers inférieur de la couche de ballast, augmentent l'imbrication des pierres.
- Les nappes composites multifonctionnelles, qui combinent filtration, renforcement et drainage.

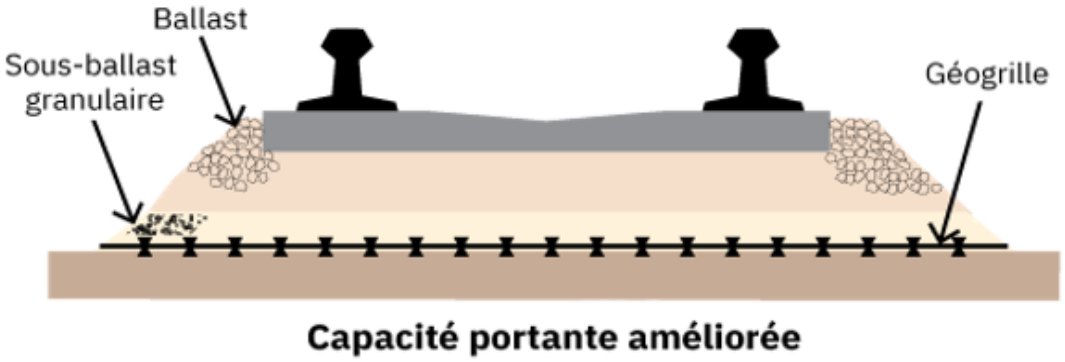


Figure II-9 : Installation d'une géogrille sous le ballast (Source: Geofabrics).[11]

Ces solutions sont particulièrement efficaces dans les zones de transition (ponts/remblais) ou sur les plateformes à faible portance, comme l'ont montré les expérimentations à grande échelle de **Brown et al. (2007)** sur le réseau britannique.[10]

[9] **https://www.plasser.com.au/fileadmin/_processed_/a/e/csm_Ballast_Bed_Cleaning_2_74338887c8.jpg**
[10] **https://www.plassertheurer.com/fileadmin/user_upload/Maschinen_Systeme/Bettungsreinigung/bettungsreinigung-4.jpg**
[11] **https://www.tensar.fr/ressources/articles/build-better-tracks-ballast-sub-ballast-stabilisation-with-geogrid-0**

II.6.3 Amélioration des systèmes de drainage :

La conception et l'entretien d'un réseau de drainage efficace sont essentiels pour prévenir la dégradation accélérée du ballast. Les travaux de **Coenraad (2001)** établissent qu'une réduction de 50% de la teneur en eau du ballast peut multiplier par 3 sa durée de vie. [11]

L'installation de dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux protège efficacement la plateforme ferroviaire contre les effets néfastes de l'humidité excessive :

- Fossés longitudinaux dimensionnés pour des pluies centennales.
- Drains transversaux en matériaux géocomposites à haute capacité hydraulique 10^{-3} à 10^{-2} m²/s).
- Pentes transversales optimisées (2% à 3%) favorisant l'écoulement par gravité.
- Masques drainants sur les côtés des remblais sensibles.

Les solutions innovantes développées par **Li et Selig (1998)** incluent également des systèmes de drainage actif par dépression, particulièrement efficaces dans les zones à faible pente ou à fort trafic [12].

II.7 Conclusion :

La dégradation du ballast ferroviaire représente un défi majeur pour les gestionnaires d'infrastructures. Sous l'effet combiné des charges cycliques, des facteurs environnementaux et de la contamination par des particules fines, le ballast perd progressivement ses propriétés mécaniques essentielles. Cette détérioration entraîne une diminution de la qualité géométrique de la voie, affectant la sécurité et le confort des circulations ferroviaires.

Les techniques modernes de diagnostic permettent aujourd'hui d'évaluer plus précisément l'état du ballast et d'optimiser les opérations de maintenance. Le développement de solutions innovantes, comme l'utilisation de géosynthétiques ou l'amélioration des propriétés des matériaux, offre des perspectives prometteuses pour prolonger la durée de vie du ballast.

Références bibliographiques :

[1] Lackenby, J., Indraratna, B., McDowell, G., & Christie, D. (2007). Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading. *Géotechnique*, 57(6), 527-536.

[2] Schmitt, L. (2014). *Étude de l'influence des caractéristiques mécaniques et géométriques du ballast sur la performance de la voie ferrée*. Doctoral dissertation, Université Paris-Est.

[3] Audley, M., & Andrews, J. D. (2013). The effects of tamping on railway track geometry degradation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 227(4), 376-391.

[4] Trinh, V. N., Tang, A. M., Cui, Y. J., Dupla, J. C., Canou, J., Calon, N., & Robinet, A. (2012). Mechanical characterisation of the fouled ballast in ancient railway track substructure by large-scale triaxial tests. *Soils and foundations*, 52(3), 511-523.

[5] De Bold, R., O'Connor, G., Morrissey, J. P., & Forde, M. C. (2015). Benchmarking large scale GPR experiments on railway ballast. *Construction and Building Materials*, 92, 31-42.

[6] Berggren, E. (2010). Railway track stiffness: dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance. *Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology*.

[7] Esveld, C. (2001). *Modern railway track*. MRT-productions.

[8] Paderno, C. (2010). *Comportement du ballast sous l'action du bourrage et du trafic ferroviaire*. Doctoral dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

[9] Indraratna, B., Nimbalkar, S., & Rujikiatkamjorn, C. (2013). Enhancement of rail track performance through utilisation of geosynthetic inclusions. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 44(1), 17-27.

[10] Brown, S. F., Brodrick, B. V., Thom, N. H., & McDowell, G. R. (2007). The Nottingham railway test facility. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 160(2), 59-65.

[11] Coenraad, B. C. (2001). *Modern railway track*. MRT-Productions Delft.

[12] Li, D., & Selig, E. T. (1998). Method for railroad track foundation design. I: Development. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(4), 316-322.

CHAPITRE III
PRÉSENTATION DU PROJET

CHAPITRE III. PRÉSENTATION DU PROJET :

III.1 Introduction :

Dans le cadre de la modernisation du réseau ferroviaire national et du développement économique du sud algérien, le projet de la ligne minière Béchar – Tindouf – Gara Djebilet constitue une infrastructure stratégique. D'une longueur de 950km cette voie unique électrifiée est conçue pour le transport mixte, avec des vitesses maximales de 160km/h pour les trains des voyageurs et 70km/h pour les trains des marchandises.

Ce projet est de but à optimiser l'acheminement du minerai de fer extrait du gisement de gara Djebilet et il assure la liaison entre les pôles miniers et industriels en facilitent l'exportation via le port d'Arzew.

III.2 Ligne minière Ouest :

La ligne minière Ouest représente une artère ferroviaire stratégique destinée à soutenir l'industrialisation du sud-ouest algérien, en reliant le port d'Oran aux vastes gisements de minerai de fer de Gara Djebilet dans la wilaya de Tindouf. D'une longueur de 1650 km, cette infrastructure traverse cinq wilayas à fort potentiel, regroupant plus de deux millions d'habitants. Le tronçon Oran–Béchar, long de 700 km, est opérationnel et a bénéficié d'un programme de modernisation intégrant des systèmes performants de signalisation et de télécommunication. La deuxième portion, couvrant 950 km entre Béchar-Tindouf-Gara Djebilet, est en phase de réalisation et constitue le cœur du projet de développement ferroviaire national.

Pensée pour le transport intensif de matières premières, cette ligne est dimensionnée pour assurer un débit annuel de 50 millions de tonnes de minerai. Le projet prévoit l'exploitation de trains de fret à très haute capacité, atteignant 2,2 km de longueur, composés de 170 wagons (Charge utile d'un Wagon : 105 tonnes) et quatre locomotives,

avec une charge à l'essieu de 32,5 tonnes — une performance

rare au niveau mondial.

Le tracé est organisé en trois grandes sections :

- Béchar–Hammaguir (200 km).
- Hammaguir–Oum El Assel (440 km).
- Oum El Assel –Tindouf–Gara Djebilet (310 km).

Chacune conçue pour répondre à des standards techniques élevées et favoriser la fluidité logistique. L'infrastructure intègre également 12 gares et haltes assurant l'articulation régionale du réseau.
Ce corridor s'inscrit dans une dynamique de renforcement de l'intégration territoriale, en facilitant l'accès aux zones enclavées et en stimulant les flux économiques entre les pôles miniers du Sud et les installations portuaires du Nord. Par son envergure, ses spécifications techniques avancées et ses ambitions économiques, la ligne minière Ouest se positionne comme l'un des projets ferroviaires les plus structurants de l'Algérie contemporaine.

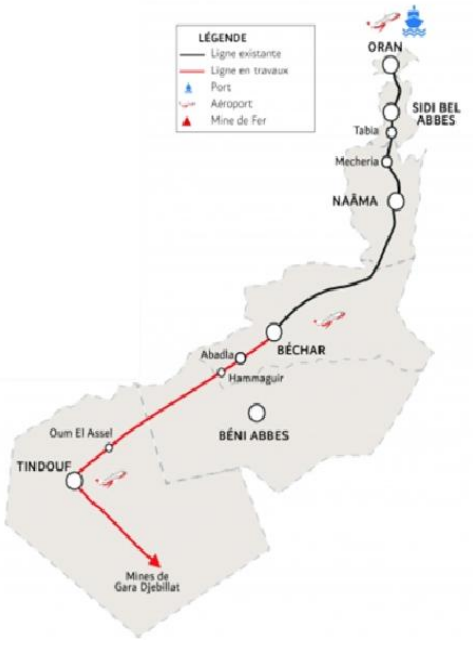


Figure III-1 : Ligne minière Ouest. [12]

[12] **https://infotraficalgerie.dz/wp-content/uploads/2017/01/carte-reseau-sntf-anesrif-train-algerie.png**

III.3 Présentation du projet étudie :

Dans le cadre de ce travail, nous présentons notre projet de fin d'études, qui consiste en une étude en Avant-Projet Détaillé (APD) d'un tronçon de la ligne de chemin de fer reliant Béchar à Gara Djebilet (wilaya de Tindouf). L'objectif principal est d'optimiser le tracé de cette ligne à vocation principalement minière, en assurant sa compatibilité avec les exigences du transport de marchandises, dans un environnement désertique.

Le tronçon étudié dans ce projet s'étend du PK 618+000 au PK 639+000, soit une longueur de 21 kilomètres en direction de Tindouf. Ce segment suit une orientation nord-est vers sud-ouest, en parallèle à la route nationale RN50 reliant Abadla (Béchar) à Chenachène (Tindouf).

Le projet inclut également la conception de la gare d'Oum El assel, située entre le PK 639+000 et le PK 642+100, afin de faciliter la régulation du trafic ferroviaire et le croisement des convois sur cette ligne à usage intensif.

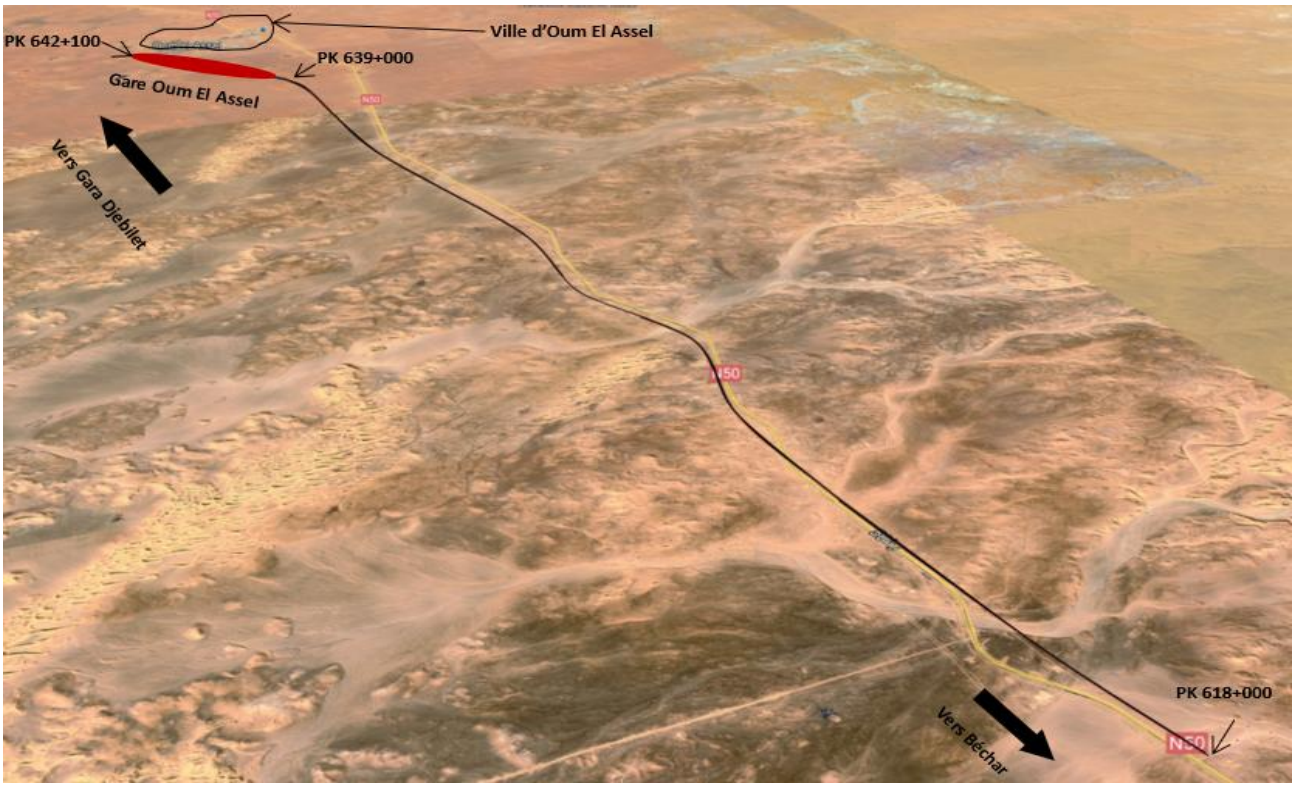


Figure III-2 : Photo illustrative du projet étudié sur Google Earth Pro.

III.4 Objectif de projet :

- Améliorer la qualité et l'efficacité du transport de voyageurs et de marchandises dans la région concernée.
- Favoriser le désenclavement des villes du Sud et accroître la part du transport ferroviaire dans cette région.
- Soutenir le développement socio-économique des zones traversées par la nouvelle infrastructure, notamment par le développement des zones industrielles et le transport efficace des marchandises.
- Assurer un transport rapide, sûr et confortable entre le Sud et le Nord, améliorant ainsi la connectivité régionale.
- Optimiser l'acheminement ferroviaire en minimisant les temps de parcours tout en maximisant la capacité de transport des marchandises.

III.5 Présentation du site :

III.5.1 Wilaya de Tindouf :

La wilaya de Tindouf couvre une superficie de 159 000 km². Sa population était estimée à 59 898 habitants en 2010. Située à l'extrême ouest de l'Algérie, elle a pour chef-lieu la ville de Tindouf. Créé en 1984 à la suite d'un découpage administratif de la wilaya de Béchar, elle se distingue par sa configuration administrative particulière : elle ne compte que deux communes, Tindouf et Oum El Assel, qui forment ensemble l'unique daïra de la wilaya. Elle est délimitée :

- au nord et à l'ouest par le Royaume du Maroc,
- au nord-est par la wilaya de Béchar,
- à l'est par la wilaya d'Adrar,
- et au sud par la République islamique

de Mauritanie et le territoire du Sahara occidental.

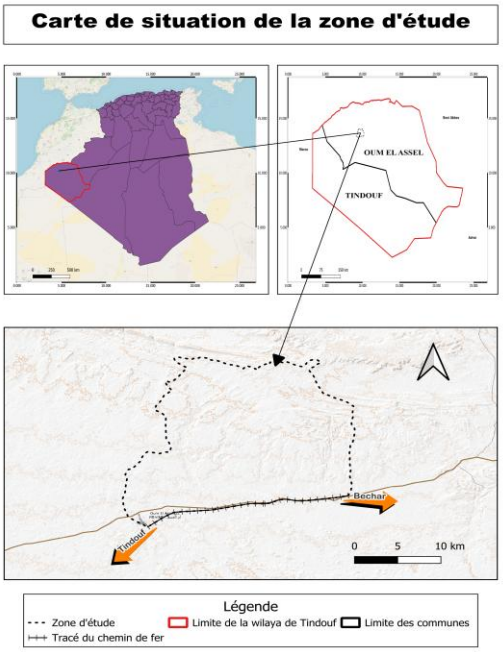


Figure III-3: Carte de situation de la zone d'étude (ArcGIS).

III.5.1.1 Relief :

La wilaya de Tindouf, située à l'extrême ouest de l'Algérie, présente un relief typiquement saharien, composé de plateaux rocheux, de vastes plaines désertiques et de formations de hamadas. Son altitude moyenne est d'environ 467 mètres.

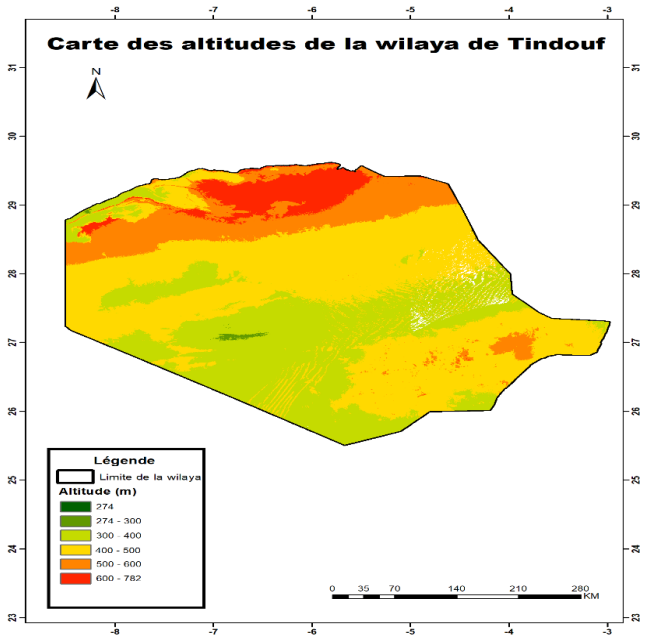


Figure III-4: Carte des altitudes de la Wilaya Tindouf (ArcGIS).

III.5.1.2 Climat et précipitations :

La zone d'étude se caractérise par un climat désertique chaud, marqué par des températures élevées tout au long de l'année. Les étés y sont particulièrement torrides, tandis que les hivers restent généralement doux. Les précipitations sont rares, avec une moyenne annuelle 50.5 millimètres. On y observe également de fortes amplitudes thermiques entre le jour et la nuit.

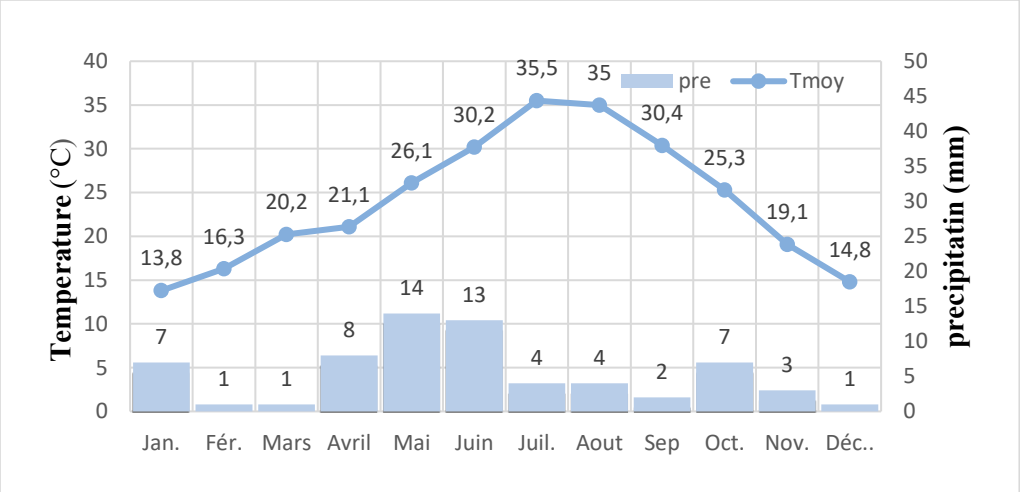


Figure III-5: Diagramme Ombrothermique de Bagnols et Gaussen de la région De TINDOUF (période : 1992 - 2022).

III.5.1.3 Le vent :

La région de Tindouf est caractérisée par un climat aride, marqué par des étés extrêmement chauds et des hivers relativement modérés. Les précipitations y sont rares et irrégulières tout au long de l'année. Sur le plan aérologique, Tindouf est soumise à des régimes venteux intenses, en particulier à l'influence du sirocco — un vent chaud, sec et violent, soufflant majoritairement de l'Ouest-Nord-Ouest. Ce phénomène éolien contribue régulièrement à l'apparition de tempêtes de sable et de poussière, réduisant fortement la visibilité et impactant les conditions environnementales locales.

III.5.1.4 Humidité :

La région se distingue par une humidité spécifique de l'air généralement faible, reflétant un environnement sec et stable sur le plan hygrométrique. Cette caractéristique constitue un paramètre climatique constant, marqué par une faible variabilité saisonnière, et contribue à l'aridité globale du milieu atmosphérique local.

III.5.1.5 Sismicité :

Conformément au Règlement Parasismique Algérien (RPA 2024), le territoire national est divisé en sept (07) zones de sismicité croissante, numérotées de 0 à VI :

- **Zone 0** : Sismicité très faible.
- **Zone I** : Sismicité faible.
- **Zone II** : Sismicité faible à moyenne.
- **Zone III** : Sismicité moyenne.
- **Zone IV** : Sismicité moyenne à élever.
- **Zone V** : Sismicité élevée.
- **Zones VI** : Sismicité très élevée.

Selon l'Annexe A du RPA 2024, qui classe les wilayas et les communes en fonction de leur niveau de sismicité, la wilaya de Tindouf, dans laquelle se situe la zone d'étude, est classée en **Zone 0**, ce qui correspond à une **sismicité très faible**.

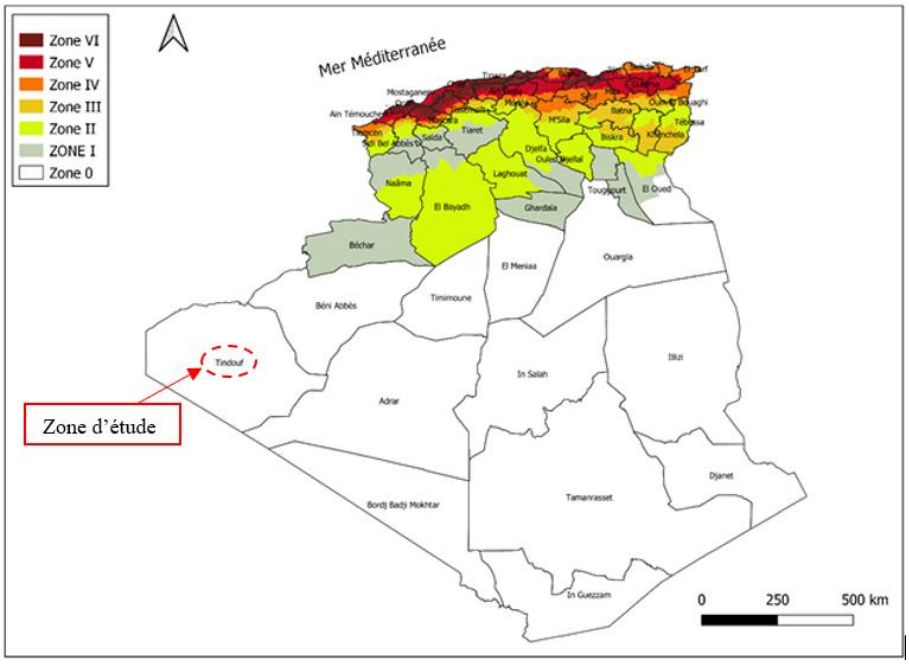


Figure III-6: Carte de zonage sismique en Algérie.[13]

III.6 Caractéristiques du projet :

Le tracé est prévu pour une ligne de chemin de fer à voie unique, tout en intégrant la possibilité d'un dédoublement future. Ainsi, l'ensemble des ouvrages d'art (ponts rails, passage supérieur, etc.) a été dimensionné dès la phase de conception pour permettre l'ajout d'une seconde voie ainsi qu'une électrification ultérieure. Cette approche vise à éviter d'éventuelles modifications structurelles coûteuses ou des interruptions de service lors des extensions futures.

Tableau III-1 : Caractéristiques du projet.

Caractéristiques	
Longueur de tracé	24,1 km
Trafic	Mixte : marchandise, voyageur
Minerais transporté	Le fer
Écartement de la voie	1435mm
Type de rail	UIC60E1
Type de traverse	Mono bloc TBP
Type d'attache	Elastique Vosloh
Ligne	Voie unique
Ouvrage d'art	Pour double voie
Largeur de la plateforme	8m pour une voie unique

[13] **RPA-2024.pdf [page :45].**

Longueur de la Gare	3100 m
Logiciel à utiliser	Civil 3D
Appareil de voie utilisé	UIC-60 300- 1 :9 avec une vitesse de 40 km/h. UIC-60 500- 1 :12 avec une vitesse de 65 km/h.
Vitesse marchandises	70 km/h
Vitesse voyageur	160 km/h
Mode de traction	Diesel
Charge à l'essieu pour les voies	32,5 t
Charge à l'essieu pour les OA	32,5 t

III.7 Conclusion :

Le projet de la nouvelle ligne ferroviaire reliant Béchar à Gara Djebilet (Tindouf) constitue un axe stratégique majeur sur le plan socio-économique national. Il vise à assurer le transport du minerai de fer extrait du grand gisement de Gara Djebilet, en reliant d'abord Béchar dans une première phase, avant de s'étendre jusqu'à Oran dans une seconde phase.

CHAPITRE IV

SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE

CHAPITRE IV. SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE :

IV.1 Introduction :

L'infrastructure ferroviaire repose sur un système d'armement de voie sophistiqué qui assure à la fois le guidage précis, la stabilité dynamique et la sécurité des circulations .Composé principalement de rails, de traverses et de dispositifs d'attache et le ballast, ce système est conçu pour absorber et répartir les contraintes mécaniques engendrées par le passage des trains, tout en garantissant une résistance minimale au roulement et en maintenant l'intégrité géométrique de la voie dans le temps.

IV.2 Le rail :

Les rails, généralement en acier, sont les éléments sur lesquels circulent les trains. Ils assurent à la fois le guidage des roues et résistent à l'usure ainsi qu'aux contraintes mécaniques générées par le passage des trains. Pour minimiser ces effets, les rails sont souvent soudés pour former des Longs Rails Soudés (LRS). Ce procédé consiste à souder plusieurs segments de rails, mesurant entre 18 et 36 mètres chacun, pour créer des sections continues d'au moins 288 mètres. Cela permet de réduire le nombre de joints et, par conséquent, l'usure.

Les LRS offrent de nombreux avantages, tels que la réduction des vibrations, une amélioration du confort de roulement, et une augmentation de la durabilité de la voie en diminuant les points de faiblesse liés aux connexions traditionnelles.

Il existe trois types de rails utilisés dans les systèmes ferroviaires :

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



Figure IV-1 : Rail type Vignole.[14]

Pour assurer la continuité des LRS, les joints doivent être soudés de façon durable afin de supporter les efforts mécaniques et thermiques. Cette opération se fait à l'aide de procédés de soudage adaptés aux exigences spécifiques.

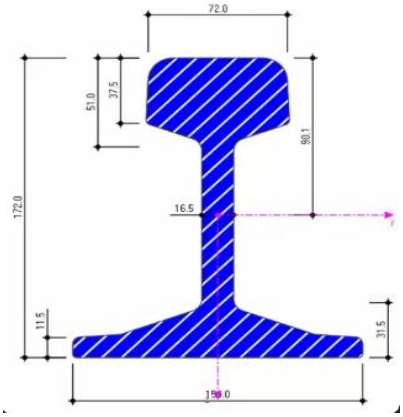
Deux procédés sont principalement utilisés pour assembler les rails :

- **Soudage aluminothermique** : Ce procédé repose sur une réaction chimique entre la poudre de l'aluminium et l'oxyde de fer, produisant un métal en fusion. Ce dernier est versé dans un moule placé autour des extrémités des rails, les soudant après refroidissement. Le surplus est ensuite meulé pour rétablir le profil du rail.
- **Soudage électrique** : Cette méthode utilise un courant électrique pour chauffer les extrémités des rails jusqu'à leur fusion. Une pression est ensuite appliquée pour les assembler. Elle permet d'obtenir une soudure de haute qualité, souvent utilisée en milieu contrôlé ou mécanisé.

Dans le cadre de ce projet, le rail utilisé est du type **Vignole UIC 60 E1 (60,21 kg/m)**, destiné à la voie principale. Les caractéristiques des rails de ce type sont les suivantes :

[14] **https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQWUaV7X1LIRtKbt9cbOthgE51y9hSeLRbLiPZdAES5JIg0EKRd-z5zyMg-eDA7Gxn-YOM&usqp=CAU**

Tableau IV-1: **Les caractéristiques de rail type UIC 60 E1.**

Rail profile 60 E1	Les caractéristiques	UIC 60
 **Figure IV-2 : Rail profile UIC 60 E1**[15]	**Norme de fabrication**	EN 13674-1
	Nuance d'acier	Acier en carbone (R260)
	Poids linéaire	(60,21 kg/m)
	La surface de la section	76.70 cm²
	Hauteur du rail	172 mm
	Largeur du champignon	72 mm
	Largeur du patin	150 mm

IV.3 Traverse :

Les traverses, fixées perpendiculairement aux rails, assurent le maintien de l'écartement et de l'inclinaison des rails. Elles transmettent également les charges aux éléments sous-jacents, tels que le ballast. Le nombre de traverses par kilomètre est généralement de 1 666 traverses /km. Il existe deux types de traverses en béton:

- **Bi-bloc** : traverse constituée de deux blocs en béton reliés par une entretoise métallique (généralement en acier), qui assure le maintien de l'écartement des rails. Ce type de traverse combine la rigidité du béton avec une certaine souplesse transversale grâce à l'entretoise, ce qui le rend adapté aux voies soumises à des variations de température ou à des mouvements de terrain.
- **Monobloc** : une poutre en béton précontraint, offrant une meilleure résistance à la flexion que la traverse Bi-bloc, avec une répartition plus uniforme des charges verticales. Ce modèle assure une meilleure stabilité de la voie et une durabilité accrue, notamment sur les lignes à fort trafic ou à grande vitesse.

Pour ce projet, le choix s'est porté sur la traverse Monobloc TBP. Il s'agit d'une traverse en béton précontraint de type PCS-IV, dont l'utilisation s'impose en raison de ses performances mécaniques supérieures et de son adaptation aux contraintes spécifiques d'une voie ferrée à très fort tonnage. Concue selon les normes EN 13230-1, -2 et -6, cette traverse offre une excellente capacité portante, une grande stabilité géométrique ainsi qu'une durabilité éprouvée face aux sollicitations dynamiques générées par les convois de marchandises lourds (jusqu'à 325 kN par essieu). Avec une longueur de 2,6 m, réalisée en béton C50/60 et armée de 10 fils de précontrainte de 7 mm, elle permet de maîtriser les contraintes au



Figure IV-3 : Traverse monobloc en BP.[16]

[15] RAIL-60-E1-UIC-60.jpg (1000×1000)

[16]https://www.newton.com.tw/img/7/58f/cGcq5yMhFTM5EmM0UDN3IGNjBTZ0cjN0MWYzYWMzkzNzMmZhZzM3YGMmlzNv0WZ0l2LjlGcvU2apFmYv02bj5SdklWYi5yYyN3Ztl2LvoDc0RHa.jpg

niveau du ballast (<550 kPa) et de garantir la résistance aux moments de flexion extrêmes. Sa préfabrication industrielle assure en outre une qualité homogène et une productivité optimisée. La justification technique complète, accompagnée des calculs de vérification, est présentée dans l'annexe J.

IV.4 Attaches et semelles :

Le système d'attache permet de maintenir le rail solidairement à la traverse, tout en assurant une certaine élasticité pour absorber les efforts verticaux, latéraux et longitudinaux. Il est généralement complété par une semelle**,** placée entre le rail et la traverse jouant un rôle essentiel dans l'amortissement des vibrations et la répartition

des charges**.**

Dans le cadre de ce projet, et pour répondre aux exigences d'un fort trafic (charge à l'essieu de 32,5 t) un système d'attache **Vossloh** est retenu, adapté aux traverses monoblocs en BP. Ce système est associé à une semelle en élastomère d'environ 9 mm d'épaisseur**,** permettant une meilleure répartition des efforts, une isolation vibratoire et une protection efficace de la traverse contre les sollicitations dynamiques.

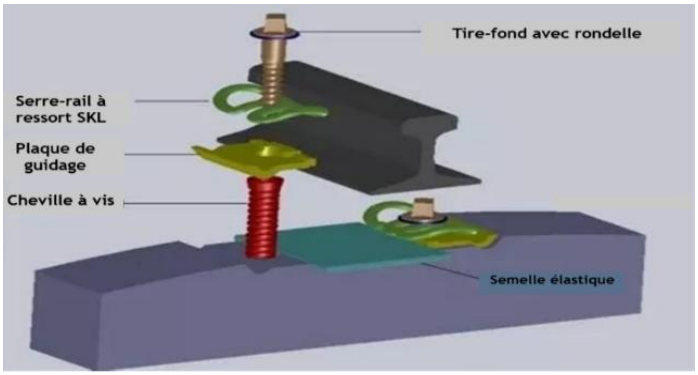


Figure IV-4: Composition de l'attache Vossloh.[17]

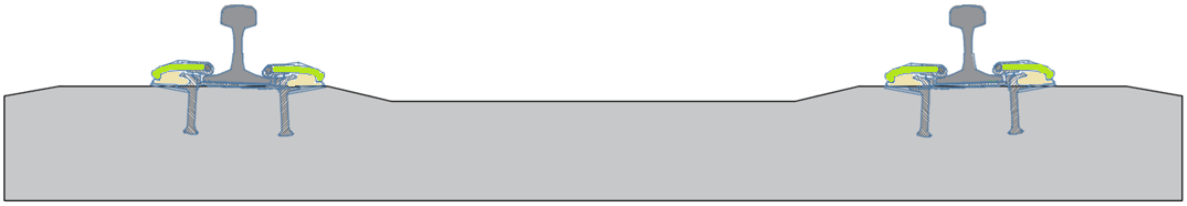


Figure IV-5: Composition de l'attache Vossloh (Autocad).

IV.5 Ballast :

Le ballast est constitué de pierres concassées anguleuses, dont la fonction principale est d'assurer la stabilité géométrique de la voie. Il permet une répartition homogène des charges transmises par les trains, facilite l'évacuation des eaux pluviales et amortit les vibrations générées par le trafic ferroviaire. La couche de ballast est disposée sous les traverses, avec une épaisseur standard de 300 mm en pleine voie, mesurée sous le rail.

Le ballast utilisé doit répondre aux exigences de la norme européenne EN 13450. Il est composé de granulats durs et résistants, provenant de carrières spécifiquement sélectionnées pour ce

[17]**https://s2.qwant.com/thumbr/474x315/c/6/1c5faf0d7323ac8eef7d85796cb113a7537a0e3409d628dbd84f6f5fcae2cf/th.jpg?u=https%3A%2F%2Ftse.mm.bing.net%2Fth%3Fid%3DOIP.O257kGIRZq47ArzaVMt5TwHaE7%26pid%3DApi&q=0&b=1&p=0&a=0**

projet. En outre, le ballast doit être conforme aux critères du fuseau granulométrique de contrôle, assurant ainsi ses performances mécaniques, sa durabilité et sa capacité de drainage.

IV.6 Les caténaires :

Le système de caténaire est un dispositif de distribution d'énergie électrique destiné à l'alimentation des trains. Il se compose principalement d'un fil de contact en cuivre, suspendu à une hauteur constante au moyen de pendules et relié à un câble porteur. Ce câble est lui-même soutenu par des consoles fixées aux supports (poteaux). L'ensemble permet le captage continu du courant par le pantographe du train, assurant ainsi une alimentation stable en courant électrique. Ce système requiert une gra ions mécaniques et géométries pour garantir u

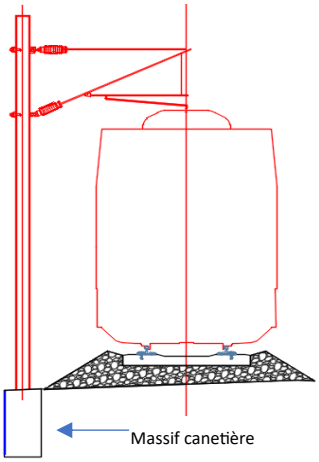


Figure IV-6 : caténaires (AutocCad).

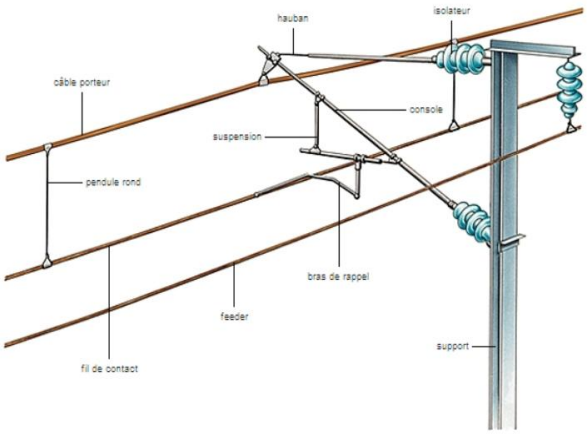


Figure IV-7: Caténaire.[18]

IV.7 Appareil de voie :

Un ensemble mécanique intégré à la voie ferrée permettant de guider les trains d'une direction à une autre. Il assure l'interconnexion entre plusieurs itinéraires en garantissant la continuité et la sécurité du roulement. Par simple translation d'un aiguillage ou d'un composant mobile, l'ADV permet de faire passer un train d'une voie principale à une voie de service, ou de franchir une bifurcation, un croisement ou un embranchement.

IV.7.1 Branchement simple :

Un branchement est un dispositif permettant au matériel roulant de passer d'une voie à une autre avec une continuité géométrique. Il est défini par un angle de déviation et une courbe de raccordement assurant un roulement sans à-coups. Il est composé de trois éléments fonctionnels :

- **Aiguille** : Lames mobiles orientant le train vers la voie directe ou déviée.
- **Partie intermédiaire** : Zone fixe avec contre-rails assurant la transition entre l'aiguille et le croisement.
- **Croisement (cœur)** : Intersection des rails, à pointe fixe ou mobile, selon les vitesses et charges admises.

[18] **https://www.larousse.fr/encyclopedie/data/images/1000916-Cat%c3%a9naire.jpg**

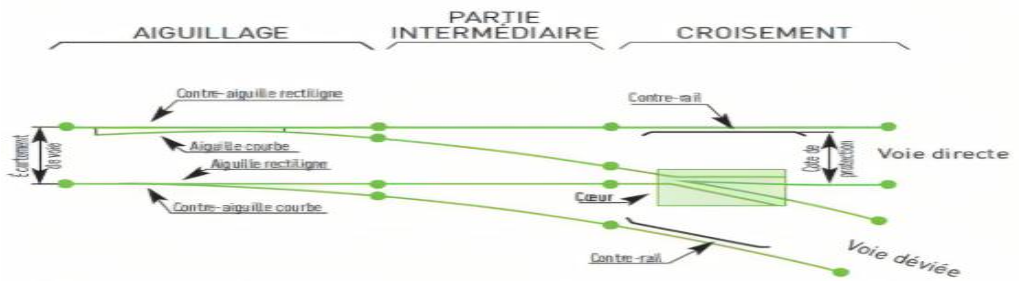


Figure IV-8: Schéma illustratif d'un appareil de voie.[19]

IV.7.2 Les traversées jonctions :

Traversée-Jonction Simple (TJS) /Traversée -Jonction Double (TJD) : Est une intersection de deux itinéraires combinés avec la possibilité d'un / de deux branchements.

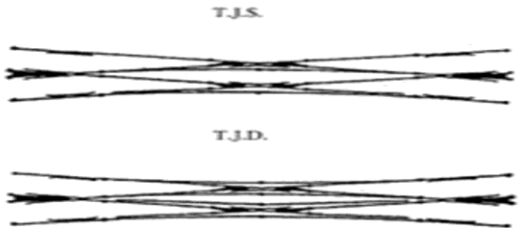


Figure IV-9 : Traversée-jonction simple/ double.

IV.7.3 Les traversées Oblique :

Traversée Oblique Ordinaire /Traversée Oblique Combinée : Permettent l'intersection de deux itinéraires

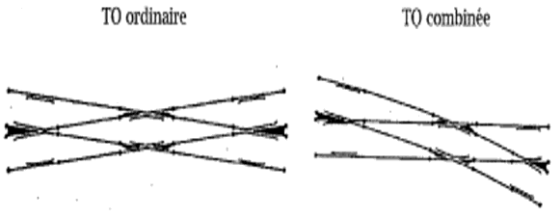


Figure IV-10 : Traversée- oblique ordinaire / combinée.

IV.8 Organisation et phasage du chantier de pose de voie :

IV.8.1 Préparation logistique et topographique :

Le chantier commence par l'installation d'une zone logistique dédiée au stockage des matériaux et équipements. En parallèle, les équipes topographiques vérifient et valident les coordonnées géométriques de la plateforme pour assurer un positionnement exact des voies conformément aux plans d'exécution.

IV.8.2 Pose des traverses :

Les traverses préalablement stockées sont mises en place mécaniquement à l'aide d'une pelle routière ou d'un portique de pose. La densité standard est de 1666 traverses par kilomètre, avec un écartement régulier de 600 mm entre chaque traverse, garantissant la stabilité longitudinale et transversale de la voie.

IV.8.3 Assemblage et fixation des rails :

Les LRS sont manipulés par une tireuse équipée de pinces spécifiques qui permettent leur levage et leur positionnement exact sur les traverses. L'assemblage des rails s'effectue par éclissage provisoire, avant fixation définitive. La fixation est réalisée par tirfonnage, utilisant

[19] 649-transport-advschema.jpg (500×367)

des attaches élastiques qui assurent une tenue mécanique optimale tout en permettant une certaine flexibilité nécessaire à la dilatation thermique.

IV.8.4 Ballastage et réglage de la voie :

La mise en place du ballast s'effectue en trois relevages distincts, avec compactage systématique après chaque couche à l'aide d'une bourreuse. La stabilité de l'ensemble est contrôlée par le passage des locotracteur chargés, simulant les efforts d'exploitation réels.

- **Premier relevage** : dépose d'une couche de 15 cm, étalée uniformément à l'aide d'une **régaleuse** pour ajuster le profil transversal. La bourreuse assure le compactage et l'alignement initial de la voie.
- **Deuxième relevage** : ajout d'une couche de 8 cm**,** suivi d'un nouveau réglage de la surface ballastée, puis compactage. Cette phase améliore l'ancrage des traverses et la portance globale.
- **Troisième relevage** : application d'une dernière couche de 5 cm **s**uivi d'un compactage final pour ajuster le nivellement et le dressage de la voie.
- **Nivellement complémentaire NC :** une intervention finale de réglage permet d'ajuster (FSR**)**, assurant la conformité exacte de la voie au profil altimétrique théorique avant mise en service.

IV.8.5 Libération des contraintes thermiques :

Une fois la voie posée, une opération de libération des contraintes est réalisée pour homogénéiser les tensions internes des rails avec des frappeurs. Cette étape est importante pour prévenir le flambement thermique. Par ailleurs, des joints de dilatation sont positionnés aux endroits stratégiques pour permettre la dilatation et la contraction des rails sous l'effet des variations thermiques, garantissant ainsi la pérennité et la sécurité de l'infrastructure.

IV.9 Conclusion :

La superstructure de la voie joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement du chemin de fer. Elle garantit la stabilité, la sécurité et le confort de circulation. Ce chapitre a permis de présenter les principaux composants de l'armement de voie (rails, traverses, attaches, ballast), ainsi que l'organisation et le phasage des travaux de pose. Grâce à des choix techniques adaptés et une mise en œuvre conforme aux normes, la voie est désormais apte à supporter le trafic intense prévu sur notre ligne ferroviaire dans de bonnes conditions d'exploitation.

CHAPITRE V
LA GÉOMÉTRIE DE LA VOIE

CHAPITRE V. LA GÉOMÉTRIE DE LA VOIE :

V.1 Introduction :

L'étude de géométrique de la voie est une étape clé et indispensable à la conception des lignes performante et sécurisées. cette démarche s'appuie sur des différentes normes. Elle vise à déterminer la configuration idéale de la voie en analysant des paramètres essentiels, afin d'assurer un roulement fluide des trains.

V.2 Trace En Plan :

Le tracé en plan se compose de la succession des alignements droits et courbes circulaires (plaines courbes et courbes de transition), il est caractérisé par deux vitesses :

- V_v: Vitesse des trains rapides (voyageurs).
- V_m: Vitesse des trains lentes (marchandises).

Ces vitesses conditionnent la conception de la trace en plan en modulant la géométrie des courbes et des alignements pour assurer les conditions des circulation optimales pour les trains des voyageurs et aussi les trains des marchandises.

V.2.1 Critères de limitation des paramètres de trace en plan :

Dans le but de sécuriser et de rendre confortable le voyage des voyageurs et de garantir la stabilité de la voie, les valeurs de certains paramètres géométriques du tracé sont limitées. Pour ces raisons, chaque critère mis en place pour chaque paramètre est :

- **Valeurs limites normales :**

Il s'agit de la valeur à ne pas dépasser pour assurer une circulation sécurisée des trains aux vitesses maximales et minimales autorisées.

- **Valeurs limites exceptionnelles** :

Cette valeur, plus contraignante que la valeur limite normale, s'applique dans des cas particuliers. Par exemple, lors de travaux de modernisation d'une ligne, il peut être nécessaire de tolérer des écarts dépassant les valeurs normales afin d'éviter des modifications structurelles gênantes, tout en maintenant un niveau de sécurité acceptable.

V.2.2 Les conditions et les règles à respecter dans le trace en plan :

Lorsqu'on élabore une trace il est essentiel de respecter certaine règle (selon la SNTF) pour garantir un bon équilibre entre faisabilité technique et viabilité économique :

- Le tracé doit rester dans le couloir préalablement défini (comme il s'agit une étude APS).
- Il fait éviter autant que possible de croiser les oueds ou les routes afin de limiter la construction d'ouvrages d'art coûteux.
- Éviter les terrains agricoles, les forêts et les propriétés privées pour limiter les conflits d'usage.
- Suivre les courbes de niveau du terrain naturel pour réduire les volumes de terrassement.
- Favoriser les alignements droits et respecter la longueur minimale requise pour les tracés rectilignes lorsque la topographie le permet. En cas de courbes obligatoires, leur rayon doit être le plus grand possible pour améliorer le confort et faciliter la circulation.
- Éviter de traverser des zones stratégiques comme les centrales à gaz ou les transformateurs électriques.
- S'éloigner des sols instables ou aux problèmes géologiques.

- Talus : pour les talus en déblai il faut prend en considération la présence des nappes phréatiques, des terrain plastiques ou des roches fissurées. Pour les talus en remblais il faut éviter les terrains instables et les sols compressibles.

V.2.3 Les éléments du trace en plan :

L'axe du tracé en plan est constitué d'une succession des alignements droits courbes de raccordements et des arcs de cercles.

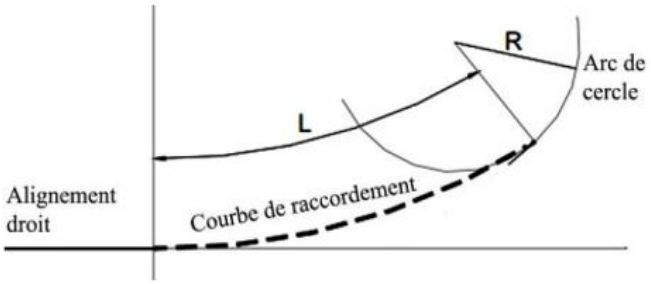


Figure V-1: Éléments constitutifs de l'axe en plan.[20]

- **Les Alignements :** un tracé droit de rayon infini, considéré comme le meilleur tracé pour le confort, la sécurité et une stabilité de trace.
- **Arc de cercle :** La liaison entre les alignements droits se fait avec des courbes avec des rayon précise.
- **Courbe de raccordement** : Un élément géométrique permet de raccorder entre un alignement et une courbe, deux courbes de même sens avec rayons différents ou entre une courbe et contre courbe. Elle donne la possibilité de passer progressivement d'un rayon infini (alignement) vers un rayon constant (arc de cercle). L'utilisation de raccordement progressif dépend de certain condition précises (gauchissement et du confort dynamique).

V.2.4 Les paramètres géométriques du trace :

Les paramètres géométriques applicables selon IN0272, a la nouvelle ligne ferroviaire Bechar – Tindouf – Gara Djebilet avec une vitesse maximale de 160 km/h et une vitesse minimale de 70km/h :

V.2.4.1 Le Dévers :

C'est la différence d'altitude entre les deux files de rails en un point de la voie, il est obtenu en surélevant le rail extérieur par rapport au rail intérieur, il sert à compenser la force centrifuge exprimé en [mm]. (Dans l'alignement droit le devers est nul).

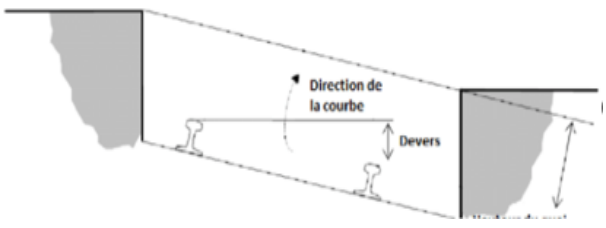


Figure V-2: devers installer pour une voie en courbe.[21]

[20] https://www.researchgate.net/profile/RafikHebib/publication/350411275_Traces_lineaires_et_materiaux/links/605e3185a6fdccbfea0b3b11/Traces-lineaires-et-materiaux.pdf [page 16 – figure II]

[21] Dévers installé pour une voie en courbe [DEV 12] Il faut également... | Download Scientific Diagram

V.2.4.1.1 Dévers Théorique (d_{th}) :

C'est l'inclinaison latérale de la voie destine à compenser la force centrifuge. Son calcul fait en fonction de la vitesse maximale de la voie. Sa formule :

Formule	Paramètre
$\mathbf{d_{th} = \frac{11.8 \times V_{Max}^{\ 2}}{R}}$	d_{th}: devers théorique en (mm) V_{Max}: la vitesse maximale de la ligne$(\frac{km}{h})$ R: Rayon de la courbe (m)

V.2.4.1.2 Dévers Pratique (d_p) :

Dans le cas de trafic mixte où la nature et la vitesse des train sont différent, l'application du dévers théorique est impossible. pour cela il faut introduire la notion de devers pratique. Pur réduire risque de déraillement. Sa formule :

Formule	Paramètre
$\boldsymbol{d_p = \frac{1000 \times C}{R}}$	d_p: devers pratique (mm)[doit être : $0.5\ d_{th} \leq d_p \leq 0.7 d_{th}$] R:Rayon de la courbe (m) C : coefficient de dévers. [doit être multiple de 15]. La formule de calculs de C avec : $C = 0.006 \times V_{Max}^{\ 2}$ Avec : V_{Max}: la vitesse maximale de la ligne.

V.2.4.1.3 Dévers maximum admissible :

Pour les projets avec une vitesse : $\boldsymbol{V \leq 220 Km/h}$ selon IN0272, les valeurs du dévers maximal sont fixées :

Tableau V-1: valeurs admissibles de devers.[22]

D_{Max}	Valeurs (mm)
Valeur normal	160
Valeur exceptionnelle	180

V.2.4.1.4 Insuffisances de devers (I) :

C'est la différence entre le devers théorique des trains rapides et devers pratique. Cette différence est une force latérale non compensée qui pouvant occasionner un déraillement à grand vitesse. La formule de calcul :

Formule	Paramètre
$\mathbf{I = d_{th} - d_p = \frac{11.8 \times V_V^{\ 2}}{R} - d_p \leq I_{max}}$	I : L'insuffisance de dévers (mm). I_{max}: la valeur limites de l'insuffisance de devers (mm): d_p: devers pratique (mm) d_{th}: devers théorique en (mm) R:Rayon de la courbe (m)

[22] IN0272

	V_V: vitesse des trains rapide (voyageurs)

Selon IN0272, en plein courbe et pour une vitesse $\boldsymbol{V \leq 220Km/h}$:

Tableau V-2: Valeur limites de l'insuffisance de devers.[23]

I	Valeurs (mm)
Valeur normal	150
Valeur exceptionnelle	160

V.2.4.1.5 Excès de devers :

Quand le train de marchandises, circule lentement en courbe, il perçoit dévers mise en place pour le train rapide comme une excès de dévers notée « E ». Cela signifie que dévers de la voie est excessive par rapport à la vitesse du train. Dans ce contexte, le Train est soumis à une force centripète non compensée, ce qui provoque une résultante des forces se dirigeant vers l'intérieur de la courbe. La formule de calcul :

Formule	Paramètre
$\mathbf{E = d_p - d_{th} =}$ $\boldsymbol{d_p - \frac{11.8 \times V_m^{\,2}}{R} \leq E_{max}}$	E : L'excès de dévers (mm). E_{max}: la valeur limites de l'exces de devers (mm): d_p: devers pratique (mm) d_{th}: devers théorique en (mm) R:Rayon de la courbe (m) V_m: vitesse des trains lents (marchandise)

Pour limite l'effet de la force de centripète non compensée, Selon IN0272, pour une vitesse $\boldsymbol{V \leq 220Km/h}$:

Tableau V-3: Valeur limites de excès de dévers.[24]

E	Valeurs (mm)
Valeur normal	110
Valeur exceptionnelle	130

V.2.4.1.6 La variation de l'insuffisance de dévers :

Représente le rythme auquel varie l'insuffisance de dévers au fil du temps notée $\frac{\Delta I}{\Delta T}$. Elle évalue la rapidité du changement de l'insuffisance de dévers pendant que le train progresse à une certaine allure sur une courbe. Sa formule est donnée par :

Formule	Paramètre
$\boldsymbol{\frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{I \times V}{3.6 \times Lrp}}$	I : L'insuffisance de dévers (mm). Lrp : Longueur de raccordement progressif en (m) V_{Max}: la vitesse $(\frac{km}{h})$

[23] IN0272
[24] IN0272

Pour les grands vitesse les valeurs limites :

Tableau V-4: Limite de variation de l'insuffisance par rapport au temps. [25]

$\Delta I/\Delta T$	Valeurs (mm)
Valeur normal	75
Valeur exceptionnelle	90

V.2.4.1.7 Variation de dévers dans les courbes de transition en fonction de longueur $\frac{\Delta d}{\Delta L}$:

La longueur des courbes de transition dépendra du dévers adopté et du taux de variation de dévers admissible. Cette variation est donnée par la formule suivante :

Formule	Paramètre
$\frac{\Delta d}{\Delta L} = \frac{dp}{Lrp}$ en (mm/m)	d_p: devers pratique (mm) Lrp : Longueur de raccordement progressif en (m).

V.2.4.1.8 Variation de dévers dans les courbes de transition en fonction du temps $\frac{\Delta d}{\Delta t}$:

Cette transition est habituellement restreinte pour garantir un passage en douceur entre les différentes sections de la voie, afin d'éviter des modifications abruptes de l'inclinaison latérale et par conséquent préserver l'équilibre du train. La formule de calculs de $\frac{\Delta d}{\Delta T}$:

Formule	Paramètre
$\frac{\Delta d}{\Delta T} = \frac{dp \times V_{Max}}{3.6 \times Lrp}$ En (mm/s)	d_p: devers pratique (mm) Lrp : Longueur de raccordement progressif en (m) V_{Max}: la vitesse maximale de la ligne $\left(\frac{km}{h}\right)$.

La variation de dévers en fonction de temps $\frac{\Delta d}{\Delta T}$et en fonction de longueur $\frac{\Delta d}{\Delta L}$ doit satisfaire à deux conditions selon IN0272.

Tableau V-5: Limite da la variation de divers.

1ère condition		2 éme condition	
en fonction de la vitesse des trains rapides.		en fonction de rayon et devers de la courbe adjacente.	
Valeur normal	Valeur Exceptionnelle	Valeur du devers en plein courbe [dp en (mm) et R en (mm)]	Valeur limite de la variation de devers en (mm /m)

[25] IN0272

Par rapport la longueur $\Delta d/\Delta L$	Par rapport au temp $\Delta d/\Delta L$	Par rapport la longueur $\Delta d/\Delta L$	Par rapport au temp $\Delta d/\Delta L$	$\frac{R-100}{2} \geq d_p \geq \frac{R-150}{2}$	$\frac{\Delta d}{\Delta L} \leq 2mm/m$
$180/V_{Max}$	50mm/s	$216/V_{Max}$	60mm/s	$\frac{R-100}{2} \geq d_p \geq \frac{R-250}{3}$	$\frac{\Delta d}{\Delta L} \leq 3mm/m$
				$\frac{R-250}{3} \geq d_p$	$\frac{\Delta d}{\Delta L} \leq 4mm/m$

V.2.4.2 Rayon minimal :

Il représente le rayon de la courbe la plus serrée du tracé que le train peut passer en toute sécurité. La formule de calculs de rayon minimal.

Formule	Paramètre
$R_{min} = \frac{11.8 \times V_{max}^2}{I_{max} + d_p}$ En fonction de I_{max} et d_p	I_{max}: la valeur limites de l'insuffusance de devers (mm d_p: devers pratique (mm) V_{max}: vitesse des trains rapide (voyageurs)
$R_{min} = \frac{11.8 \times (V_v^2 - V_m^2)}{I_{max} + E_{max}}$	V_m: vitesse des trains lents (marchandise) V_V: vitesse des trains rapide (voyageurs) I_{max}: la valeur limites de l'insuffusance de devers (mm E_{max}: la valeur limites de l'exces de devers (mm)

- **Dévers du rayon minimal :** $d(R_{min}) = \frac{E_{max} \times V_v^2 - I_{max} \times V_m^2}{V_v^2 - V_m^2} \leq d_{p_{max}}$

V.2.4.3 Longueur minimale des éléments de trace :

Il est nécessaire de respecter les longueurs minimales des alignements dans les différentes positions, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Tableau V-6 : Les longueurs minimales des alignements et des pleines courbes.[26]

RP	Courbes avec RP et doucines		Courbes avec RP sans doucines	Courbes sans RP
Valeur limite normale	V/2	60m	V/3	V/2
Valeur limite exceptionnelle	V/3	50m	V/5	V/2,5

- **Doucine :**

C'est un raccordement circulaire utilisé pour limiter l'accélération du mouvement de roulis au changement de pente du rail haut et pour assurer le confort et éviter le choc lors de passage de trains entre les pentes du rail haut centré sur le point de rupture de pente (ORP ou FRP).

[26] IN0272

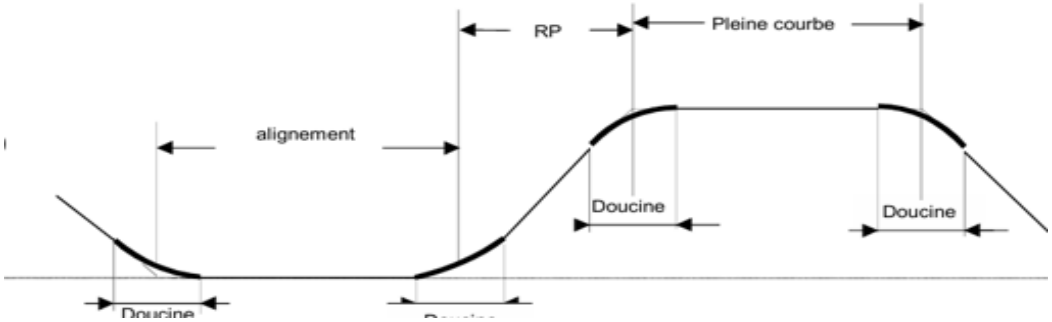


Figure V-3: les éléments de trace en plan.[27]

L'emploi des doucines :

Lorsque les trains de voyageurs ont une vitesse égale ou supérieure à 60 km/h, et qu'il y a une variation considérable du dévers, les doucines sont obligatoires (supérieure à 60/v).

V.2.5 Application au projet :

- **Description du tronçon de PK 618+00 AU PK 642+100** :

Notre tronçon reliant Béchar à Tindouf débute au point kilométrique (PK) 618+000 et s'étend jusqu'au PK 642+100. Le tracé démarre sur une ligne droite et se termine par une ligne droite. Il s'étend sur une longueur totale de 24 100 mètres et comprend 5 courbes horizontales dont les rayons varient entre 2 300 mètres et 4000 mètres.

- **Vitesse** :
  - Vitesse de conception du tracé pour le Trafic voyageurs :160 km/h
  - Vitesse de conception du tracé pour le Trafic marchandise :70 km/h

- Paramètres géométriques du tracé selon SNTF :

Tableau V-7: Paramètres géométriques du tracé en plan.

Valeurs	Normal	Exceptionnelle
Dévers max	160mm	180mm
Insuffisance de dévers	150mm	160 mm
Excès de dévers	110mm	130 mm
Variation de l'insuffisance de dévers en fonction du temps	75mm/s	90mm/s
Variation de dévers en fonction du temps	50mm/s	60mm/s
Variation de dévers en fonction de la longueur	1,125 mm/m	1,350 mm/m
Rayon minimale	974m	___

- **Les calculs** : On prend un exemple de calcul pour un rayon de 2300 m, pour illustrer les différentes étapes :

[27] **IN0272**

Tableau V-8:Exemple de calculs pour R=2300m.

	Formule	**AN**	**Résultats**
Longueur minimale de l'alignement	$L_{min} = v_{max}/2$	$L_{min} = 160/2$	80m
Raccordement progressif est obligatoire	$\Delta C = \frac{1000}{R} > \frac{7000}{V_{Max}^2}$	$\Delta C = \frac{1000}{2300} > \frac{7000}{160^2}$	$\Delta C = 0.43 > 0.28$ Obligatoire
Dévers théorique pour les trais rapide	$d_{thvoy} = \frac{11.8 \times V_{Max}^2}{R}$	$d_{th} = \frac{11.8 \times 160^2}{2300}$	≈131.34mm
Dévers théorique pour les trais lents	$d_{thmar} = \frac{11.8 \times V_{Marchendise}^2}{R}$	$d_{th} = \frac{11.8 \times 70^2}{2300}$	≈25.14
Coefficient de devers.	$C = 0.006 \times V_{Max}^2$	$C = 0.006 \times 160^2$	≈ 153.6 On prend165
Vérification de C	$0.5 < \frac{C}{0.118 \times V_{Max}^2} < 0.7$	$\frac{165}{0.118 \times 160^2}$	$0.5 < 0.54 < 0.7$ Vérifié
Dévers pratique	$d_p = \frac{1000 \times C}{R}$	$d_p = \frac{1000 \times C}{2300}$	$71.74 \leq$ Dmax = 160mm Vérifié
Le devers pratique adopte égale 25 mm			
Insuffisance de devers	$I = d_{thmax} - d_p \leq I_{max}$	$I = 131.34 - 25$	$106.24 \leq I_{max} = 150mm$ Vérifié
Excès de devers	$= d_p - d_{thmin} \leq I_{max}$	E=25 -25.14	$0 \quad mm \leq E_{max} =$ 110mm Vérifié
Longueur de la clothoïde	$L_{rp} = \frac{d_p \times V_{Max}}{180}$	$L_{rp} = \frac{25 \times 160}{180}$	$\approx 22m$ $L_{rp\ adopté} = 100m$
Le paramètre du clothoïde :	$A = \sqrt{L_{rp} \times R}$	$A = \sqrt{100 \times 2300}$	479.58
Variation de dévers par rapport aux longueurs	$\frac{\Delta d}{\Delta L} = \frac{dp}{Lrp}$	$\frac{\Delta d}{\Delta L} = \frac{30}{100}$	$0.3mm/m \leq 1.25mm/m$ Vérifié

Variation de dévers par rapport au temps	$\frac{\Delta d}{\Delta T} = \frac{dp \times V_{Max}}{3.6 \times Lrp}$	$\frac{\Delta d}{\Delta T} = \frac{30 \times 160}{3.6 \times 100}$	13,34mm/s≤ 50mm/s Vérifié
Variation de l'insuffisance de dévers par rapport au temps	$\frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{I \times V}{3.6 \times Lrp}$	$\frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{106,24 \times 160}{3.6 \times 100}$	38,37mm/s≤ 75mm/s Vérifié

- **NB : justification d'utilisation de R=2300m et Devers de 25mm :**

Dans le cadre de notre projet ferroviaire, principalement orienté vers le transport de marchandises, le choix des paramètres géométriques de la voie a été ajusté afin d'optimiser à la fois la sécurité, la performance et la durabilité de l'infrastructure. À cet effet, une nouvelle approche de calcul a été adoptée, tenant compte des exigences spécifiques du fret ferroviaire.

La configuration en plan intègre un **rayon de courbure de 2300 mètres**, ce qui permet :

- D'assurer une meilleure stabilité dynamique des convois, notamment à des vitesses commerciales modérées typiques du trafic de marchandises,
- De réduire les sollicitations latérales exercées sur la voie, diminuant ainsi l'usure des rails et des boudins de roues,
- Et d'améliorer le confort de roulement, dans le cas de circulation mixte avec des trains de voyageurs.

Concernant le **dévers**, un dévers théorique uniforme de **25 mm** a été retenu, en parfaite adéquation avec la formule classique du dévers théorique :

$$d_{adopte} = d_{theorique} = \frac{11.8 \times {V_M}^2}{R},$$

avec : V_M : $est\ la\ vitesse\ des\ trains\ de\ marchandises$ (en km/h),

Cette configuration permet d'atteindre un équilibre optimal entre les contraintes mécaniques imposées à l'infrastructure et les conditions de circulation spécifiques au trafic de fret.

Les principales motivations ayant conduit à cette modification sont les suivantes :

- **Réduction de l'usure des rails et des équipements roulants**, contribuant à une meilleure longévité des installations et à une diminution significative des coûts d'entretien.
- **Prépondérance du trafic de marchandises** dans le secteur étudié, imposant une adaptation fine du tracé aux exigences de ce type de circulation.
- **Amélioration de l'efficacité opérationnelle**, en facilitant la gestion du trafic lourd et en assurant des performances durables dans le temps.

Ainsi, le choix du rayon de 2300 m et d'un dévers de 25 mm résulte d'une démarche rationnelle fondée sur l'optimisation du comportement dynamique des trains de marchandises, dans une logique de pérennité de l'infrastructure et de réduction des coûts d'exploitation.

Tableau V-9:Tableau récapitulatif des éléments de tracé en plan.

	RAYON (m)		
	2300	**3200**	**4000**
$d_{th\ voy}$(mm)	131.34	94,40	75,52

$d_{th\ mar}$(mm)	25,14	18,07	14,45
C	153.6		
C_{retenu}	165		
Vérification de C	$0.5 < 0.54 < 0.7 \Rightarrow$ Vérifié		
d_p(mm)	71.74	51,56	41,25
$d_{p\ adopte}$(mm)	25	18	15
Vérification de $d_{p\ retenu}$	$d_{p\ adopte}(mm) \leq Dmax = 160mm \Rightarrow$ Vérifié		
I(mm)	106.24	76,4	60,52
Vérification de I	$I \leq I_{max} = 150mm \Rightarrow$ Vérifié		
E(mm)	0	0	0
Vérification de E	$E \leq I_{max} = 150mm \Rightarrow$ Vérifié		
L_{rp}(m)	23	16	14
$L_{rp\ retenu}$(m)	100	100	100
$\Delta d/\Delta L$	0.25	0.18	0.15
Vérification de $\Delta d/\Delta L$	$\Delta d/\Delta L \leq 1.25mm/m \Rightarrow$ Vérifié		
$\Delta d/\Delta T$	11.11	8	6 ,70
Vérification de$\Delta d/\Delta T$	$\Delta d/\Delta T \leq 50mm/s \Rightarrow$ Vérifié		
$\Delta I/\Delta T$	38,37	22,22	13,10
Vérification de$\Delta I/\Delta T$	$\Delta I/\Delta T \leq 75mm/s \Rightarrow$ Vérifié		

NB : le tracé a été réalisé à l'aide du logiciel CIVIL 2024 et les éléments du tracé en plan sont annexés au présent document.

V.2.6 Les contraintes le long du tracé :

Le tableau suivant illustre les diverses contraintes présentes sur notre tracé :

Tableau V-10 : contraintes du tracé.

Obstacle à franchir	PK	Ouvrage Projeté / mesures prévues
Oued Labiadh	619+775	Ouvrages hydrauliques
Oued El foula	628+375	
Oued Ain el Mirate	634+300	
	635+509	

Route RN 50	622+730	Passage supérieure
Ligne électrique moyennes tension MT	619+913	Possibiliser de : • Déplacer. • Protéger.
	641+785	
Lignes électriques basses tension	641+525	
Ligne des fibres optique	627+283	
	628+442	
	629+327	
Conduites AEP (adduction en eau potable)	640+908	Possibiliser de : • Déplacer. • Protéger.
	641+670	
Conduites EU (eau usée)	641+225	Déplacement sous le dalot

V.3 Profil en long :

V.3.1 Introduction :

Dans le cadre de l'élaboration des infrastructures ferroviaires, le profil en long constitue un élément privilégié. Cette visualisation graphique de l'élévation longitudinale de la voie est déterminante, à plusieurs titres, à commencer par celui du projet technique, car elle permet d'adapter le tracé à la topographie du terrain ainsi qu'aux gradients de circulation ferroviaire souhaités, gage d'une exploitation ferrée non seulement plus sûre, mais également plus fluide et garantissant vitesse de croisière et confort de transport aux usagers ; au niveau financier, elle permet d'anticiper les coûts de terrassement et d'ouvrages d'art à réaliser ; d'où l'importance cruciale de cet outil de planification pour aboutir à un projet ferroviaire à la fois techniquement pertinent, économiquement viable et transportant dans de bonnes conditions.

V.3.2 Élément de profil en long :

V.3.2.1 Les alignements droits :

Le profil longitudinal présente des inclinaisons significatives, ce qui se manifeste par la tangente de l'angle entre le profil longitudinal et l'horizontale. Cela génère une rampe pour les ascensions et une pente pour les dégringolades, garantissant ainsi une sécurité maximale et un bon départ.

De plus, il est important de noter que lors de la conception de la gare, on utilise souvent un palier d'une longueur supérieure à 1200 mètres.

Tableau V-11: Les déclivités maximales.

L (m)	Normal	Exceptionnel
L< 3000	16‰	18‰
3000 < L<15000	16‰ à 13‰	18‰ à 15‰
L> 15000	13‰	15‰

La gare	0‰	0‰

L'installation idéale des segments droits dépend d'une analyse multicritère qui comprend :

- Le perfectionnement de l'équilibre déblai-remblai pour optimiser les travaux de terrassement.
- L'élimination des points bas susceptibles d'entraver le flux hydraulique.
- La mise en œuvre de méthodes compensatoires : élévation des points critiques ou contrôle des pentes.
- L'ajustement spécifique aux zones inondables par élévation préventive.
- L'observation d'une horizontalité rigoureuse aux lieux d'installation des appareils de voie.
- La cohérence géométrique entre le tracé planimétrique et altimétrique pour une intégration paysagère agréable.

Pour ça il est nécessaire de limiter la longueur minimale des déclivités :

Tableau V-12: Longueurs minimales des déclivités.

Les paramètres	Normal	Exceptionnel
La longueur minimale des déclivités	V/2	V/2.5

NB : Dans le cadre de cette étude, bien que les valeurs limites soient généralement définies par la réglementation en vigueur de la SNTF, le profil en long de la ligne étudiée est soumis à des exigences plus strictes que celles du tracé en plan, en raison des contraintes d'exploitation liées au trafic. En effet, des trains minéraliers de 2 200 mètres de long, transportant une charge de 22 100 tonnes, circulent huit fois par jour entre Béchar a Gara Djebilet. Afin d'assurer la régularité et la sécurité de ces circulations, le plan de transport impose les conditions suivantes :

- une pente maximale de 8 ‰ dans le sens chargé.
- une rampe maximale de 6 ‰ également dans le sens chargé.
- une pente nulle (0 ‰) au niveau des gares pour garantir des conditions d'arrêt, de manœuvre et de sécurité optimales.

V.3.3 Les raccordements :

Quand un véhicule ferroviaire passe d'une déclivité à une déclivité, l'accélération verticale résultant est brusque dans les extrémités du raccordement et elle peut aller jusqu'à exciter les oscillations de la suspension du véhicule, ce qui perturbe le confort des passagers. Cette accélération peut être déterminée par la relation qui suit :

Tableau V-13: valeurs de A_v pour une vitesse de 220km/h.

Formule	$A_V = V^2 / 3.6^2 \times R_V$
Valeur normal	$0.22\ m/s^2$
Valeur exceptionnel	$0.31\ m/s^2$

Selon SNTF :

Tableau V-14: valeurs de R_v.

Formule	$R_V = V^2 / 3.6^2 \times R_V$
Valeur normal	**0.36 V²**
Valeur exceptionnel	**0.25V²**

Il est important de noter que la position des cercles par rapport au terrain naturel est influencée par plusieurs facteurs, tels que :

- L'installation des dispositifs de voie ne doit pas être en courbe.
- Il est déconseillé d'avoir des conflits entre les courbes de transition en plan et les courbes de raccordement en profil longitudinal.

V.3.4 Application sur le projet :

Tableau V-15:Paramètres géométriques de profil en long (SNTF).

		D_{max}		R_{min}(m)	$L_{min}(m)$
		L< 3000m	Gare		
Formule	Normal	-	-	0.36 V²	V/2
	Exceptionnel	-	-	0.25V²	V/2.5
Application	Normal	Sens charge 6‰	0‰	8960	80
		Sens vide 8‰			
	Exceptionnel	-	0‰	6400	64

NB : le profil en long a été réalisé à l'aide du logiciel CIVIL 2024 et les éléments du profil en long sont annexés au présent document.

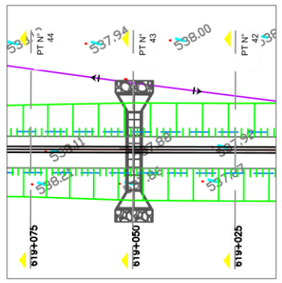
V.4 Conclusion :

Une étude géométrique rigoureuse est essentielle pour garantir la sécurité, la stabilité et l'efficacité des voies ferrées. L'optimisation du tracé en plan et du profil en long permet de concilier faisabilité technique, maîtrise des coûts et réduction des impacts environnementaux. L'intégration des normes dès les phases initiales assure la conformité réglementaire et le confort des usagers. Ainsi, une conception alignée sur les exigences techniques et réglementaires est la clé d'une infrastructure fiable et durable.

OH N°03 Type : Dalot
Nombre =05 Dimension (3*2)

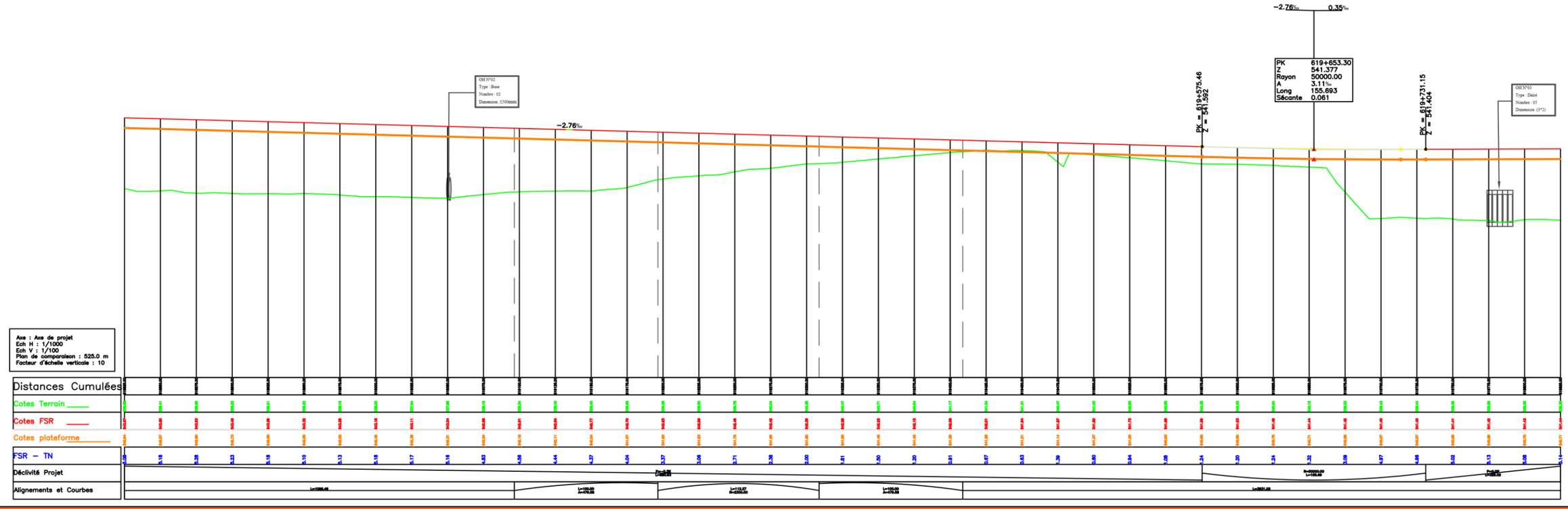


OH N°02 Type : Buse
Nombre =02 Dimension :1500mm



Poteau électrique
MT a déplacer





ENSTP

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

PROJET DE FIN D'ETUDES	Réalisé par	Encadré par	Echelle	N° Planche	Année universitaire
Etude en APD de la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique Béchar-Tindouf-Gara Djebilet du PK618+000 au PK639+000 avec la conception de la gare de OUM EL ASSEL	BRAIK Raounek BOUCHIREB Khawla	Mr.BENINAL Abdelaziz	1/1000 1/100	Vue en plan et profil en long du PK 618+825 au PK 619+825	2024 / 2025

CHAPITRE VI
ÉTUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

CHAPITRE VI. ÉTUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE :

VI.1 Introduction :

En matière de projets ferroviaires, l'hydrologie et l'hydraulique sont reconnues comme des domaine d'étude essentielles pour comprendre et gérer les ressources en eau. L'analyse des schémas de précipitations, des flux fluviaux et du danger d'inondations met en évidence non seulement les défis, mais également les possibilités liées à la planification, à l'évaluation et à la mise en œuvre des infrastructures ferroviaires. En plaçant le cadre théorique en situation réelle, l'hydrologie et l'hydraulique fournissent une approche méthodologique pour identifier et gérer les contraintes liées aux incidents hydrologiques dans les projets ferroviaires, assurant ainsi leur solidité et leur durabilité. Cette section de l'étude se concentrera sur l'analyse hydrologique et hydraulique du projet spécifique du tracé de ligne minière Béchar-Tindouf-Gara Djebilet de PK 618+000 à PK 642+100.

VI.2 Méthodologie et critères de conception :

Les différentes phases indispensables pour accomplir cette tâche incluent :

- La collecte et l'examen de documents ainsi que d'études hydrologiques concernant la région.
- L'obtention et l'analyse de cartes topographiques pour la région du projet.
- L'acquisition de données pluviales auprès de l'ONM est effectuée pour la région visée.
- L'emploi des cartes topographiques (carte état-major) pour repérer les parcours des oueds qui traversent la voie ferrée et délimitation bassins versants.
- Le calcul des paramètres géomorphologiques et physiques des bassins versants.
- L'estimation des débits de crue pour diverses périodes de retour.
- L'estimation des débits de saturation pour chaque type d'infrastructure hydraulique se fait en employant des critères tels que la section mouillée, la vitesse d'écoulement et la rugosité de l'ouvrage. Ceci permettra de dimensionner correctement les ouvrages hydrauliques longitudinaux et transversaux.

VI.3 Étude hydrologique :

Une étude hydrologique implique un examen minutieux des phénomènes hydrologiques d'une région donnée en recueillant des informations sur les précipitations, le ruissellement et les débits de cours d'eau. Sa fonction principale est de définir la disponibilité et la distribution de l'eau dans la région, facilitant ainsi l'évaluation des débits de crue, l'analyse des risques d'inondation et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

VI.3.1 Présentation générale de la zone de projet :

Selon le découpage hydrologique national établi par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), l'Algérie compte 13 bassins versants principaux. Le projet de la ligne minière Béchar – Tindouf – Gara Djebilet est situé dans le bassin versant n°13, correspondant à la région saharienne. Ce bassin est subdivisé en 10 sous-bassins, parmi lesquels le sous-bassin n°02, dit d'Iguidi Draa, où se situe précisément le tronçon d'étude. Ce sous-bassin, localisé dans le sud-ouest algérien, est caractérisé par un régime hydrologique saharien, alimenté par les précipitations irrégulières et le ruissellement provenant notamment du massif de l'Atlas saharien.

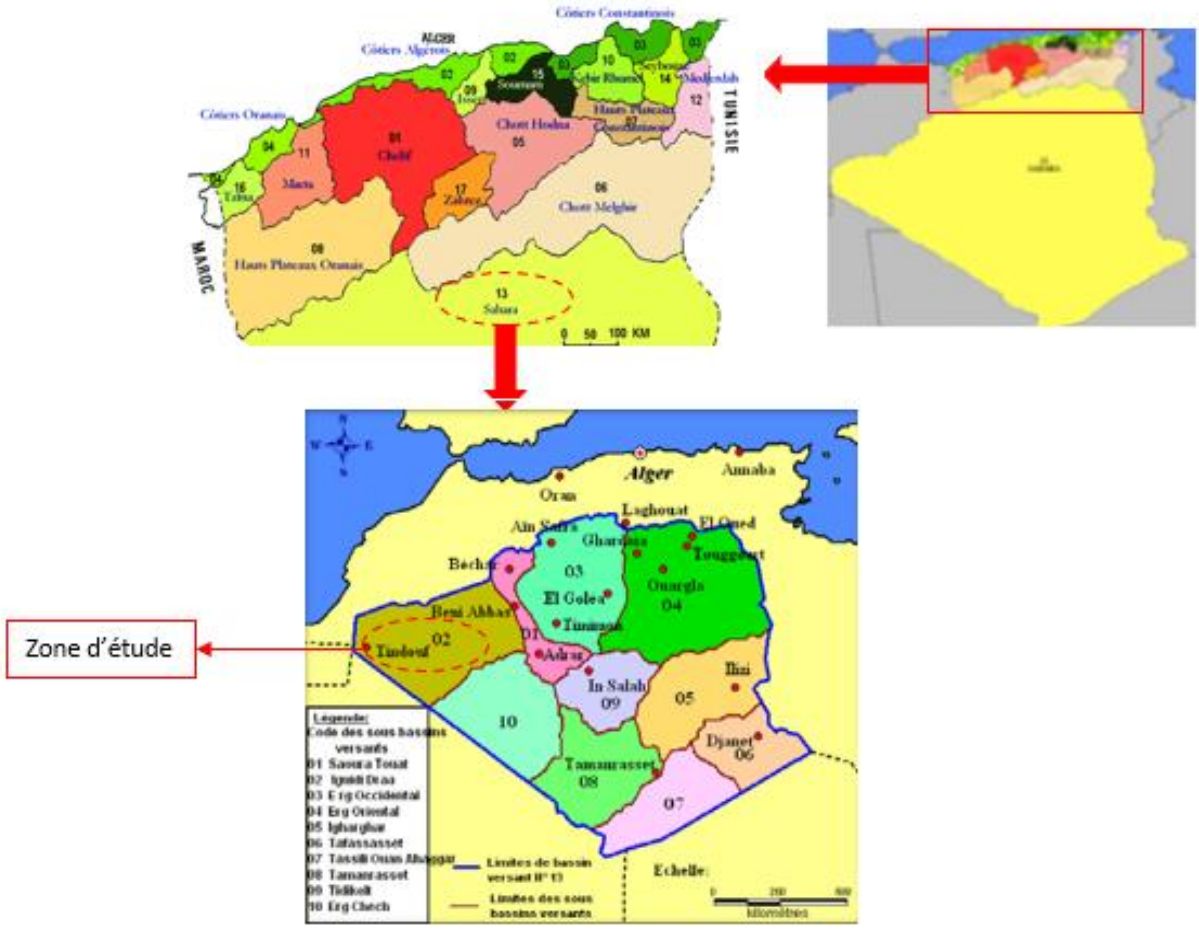


Figure VI-1 : Carte des bassins versants de l'Algérie et découpage en sous-bassins du bassin versant saharien (bassin n°13).

VI.3.2 Caractéristique climatique et pluviométriques :

VI.3.2.1 Climat :

La wilaya de Tindouf présente un climat désertique chaud, des hivers doux mais avec des nuits froides et des précipitations faibles concentré principalement en hiver et des étés chauds.

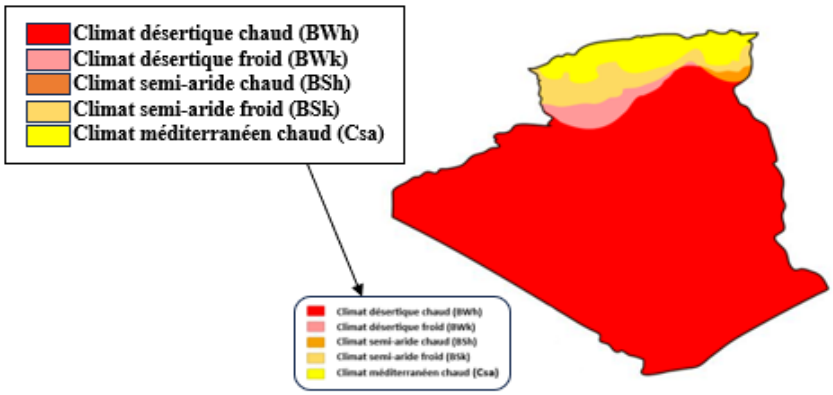


Figure VI-2 Carte climatique de l'Algérie.[28]

[28] arthwise.bgs.ac.uk/images/f/f6/Algeria_ClimateZones.png

VI.3.2.1 Température :

Les valeurs de températures mensuelles enregistrés au niveau de la station de Tindouf pour la période entre (1992-2020).

Tableau VI-1: Température en C° mesurées à Tindouf pour la période (1992-2020).

Mois	Jan.	Fér.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc..	
T_{min}	7	9	12	15	17	21	27	27	23	18	12	8	
T_{max}	21	24	28	31	35	39	44	43	38	32	26	22	
T_{moy}	13.8	16.3	20.2	21.1	26.1	30.2	35.5	35	30.4	25.3	19.1	14.8	$T_{moy\text{-}ann}$= 23.98

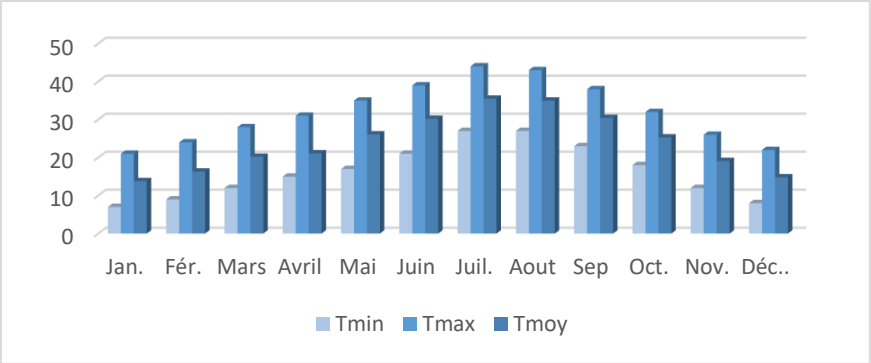


Figure VI-3:variation des températures mensuelle en C°.

D'après le tableau et l'histogramme, mettant en évidence un climat désertique marque par fortes amplitudes thermique. Les températures minimales varient entre 7°C à 27°C, tandis que les maximales atteignent 44°C en été. Pour les températures moyennes mensuelles confirme une chaleur intense entre mai et septembre, avec une légère baisse en hiver.

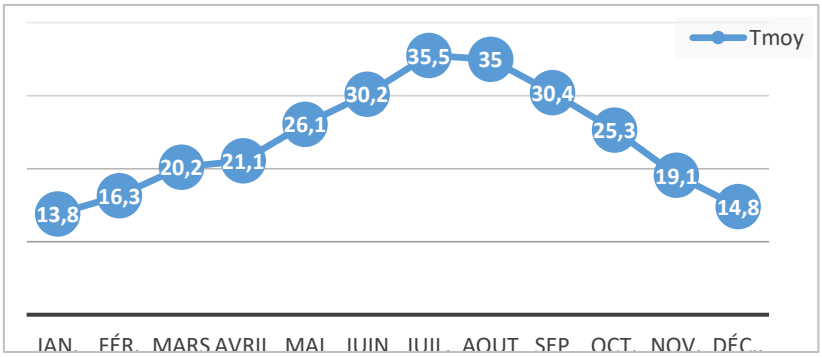


Figure VI-4:Température moyenne annuelle de la station de Tindouf source ONM.

D'après le graphe, en distingue deux périodes : Une période froide de novembre à avril, Une période chaude de mai à octobre.

VI.3.2.2 Les précipitations :

L'analyse de la pluviométrie est d'une grande importance en hydrogéologie pour déterminer le volume d'eau qui s'est déversé sur l'intégralité du bassin versant et son impact sur la recharge, ainsi que son implication dans la modification du comportement hydrodynamique de la nappe.

Les informations relatives à la zone d'étude ont été collectées à partir de l'Office National de la Météorologie (O.N.M). on va travailler sur la station de Tindouf pour notre tronçon du PK 618+000 au PK 642+100 qui fait partie de la Wilaya de Tindouf.

a) La précipitation journalière :

Les précipitations journalières se réfèrent aux quantités de pluie accumuler en une journée. On les utilise fréquemment dans les études de fréquence pour prévoir et minimiser les effets des événements hydrologiques extrêmes.

Le tableau ci-après présente les précipitations journalières maximales estimées pour différentes périodes de retour, obtenues par ajustement des données à la loi de Gumbel. (100ans = 86.40)

Tableau VI-2:Pluies journaliers maximales fréquentielles (mm).

Période de retour (ans)	10	50	100
Fréquence	0,9	0,98	0.99
U. Gumbel	2,250	3,902	4,600
Pluie journalière maximale (mm)	44,84	69,14	79,42

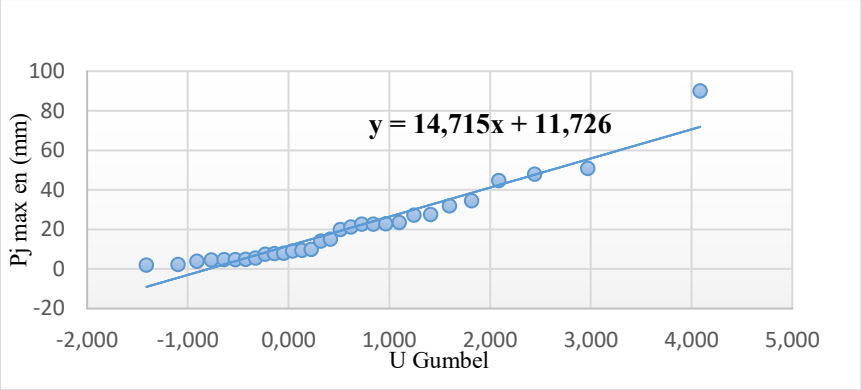


Figure VI-5:Ajustement des pluies journalières maximales.

L'analyse des précipitations journalières maximales s'appuie sur les données observées à la station pluviométrique de Tindouf sur la période 1992–2022.

Tableau VI-3:Précipitation journalière maximale au niveau de la station de Tindouf dans la période (1992-2022).

Années	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
$P_{j\ max\ (mm)}$	17,3	8	93	2.30	21.21	4.60	10	27.60	20	5
Années	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
$P_{j\ max\ (mm)}$	14.20	50.90	5.60	15.10	47.90	2	9.10	32	27.30	22.80
Années	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
$P_{j\ max\ (mm)}$	7.80	7.50	23.60	44.80	22.90	4.80	34.50	22.80	4.80	9.40
Années	2022									
$P_{j\ max\ (mm)}$	3.90									

b) La précipitation mensuelles et saisonnière :

Notre étude basse sur les donnes enregistre au niveau de la station de Tindouf durant trente ans du (1992-2020).

Tableau VI-4 : Les précipitations mensuelles et saisonnières.

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil	Aout
$P_{mensuelle}$ (mm)	2	7	3	1	7	1	1	8	14	13	4	4
$P_{mensuelle}$ %	3	8	4	2	8	2	2	10	16	15	5	5
Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
$P_{mensuelle}$ (mm)	12			9			23			21		
$P_{mensuelle}$ %	14			11			27			25		

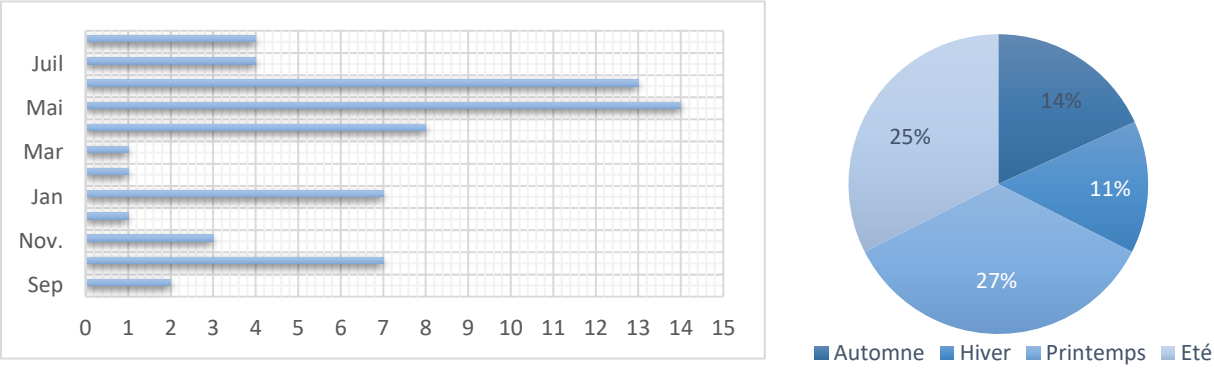


Figure VI-6 : Variation des précipitations moyennes mensuelles et saisonnières.

Selon le tableau et la figure VII-6, le mois de mai enregistre le niveau le plus élevé de précipitation avec 14mm, tandis que les mois de décembre, février et mars affichent la valeur minimale avec 1mm. Concernant la saisonnalité, le printemps ressort comme la saison la plus humide, avec une précipitation de 23 mm qui constitue 27% du total annuel. L'été arrivé juste après avec 21 mm (25% de l'année). Cette étude met en évidence une accumulation de précipitations durant le printemps et les mois estivaux, spécifiquement en mai, juin et juillet. Ces mois sont importants pour le bilan hydrique annuel et peuvent influencer de manière importante les conditions environnementales et agricoles au niveau local.

c) La précipitation moyenne annuelle :

Cette zone se distingue par des précipitations très fluctuantes d'une année à l'autre.

Tableau VI-5 : Précipitations annuelles moyennes (mm).

Station	Période d'observation	Nombre d'années d'observation	Moyenne Annuelle (mm)
Tindouf	1992-2022	31 années	50.5

d) La pluie a court durée :

L'étude de la corrélation entre l'intensité, la durée et la fréquence de précipitation se réalise a partie des données pluviométriques enregistré. En se basant sur des analyses a intensité constante, nous déterminons les quantités de pluie associée à différents intervalles de temps (24heure,48 heures,72 heures,96 heures,120 heures). Nous avons recueilli une série de données pour chaque intervalle de temps. Cette relation se présente sous la forme suivante :

$$I(t.T) = {}^{a(T)}/_{t^b}$$

- I : Intensité de pluie [mm/h].
- T : Période de retour [ans].
- t : Temps [h].
- a et b : Paramètres de Montana.

Tableau VI-6: Les valeurs des paramètres de Montana pour les différentes périodes de retour.

Coefficient de Montana	Temps de retour					
	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans
b	0.83	0.83	0.84	0.84	0.84	0.84
a	10.21	20.64	27.54	34.16	42.74	50.17

Tableau VI-7: Valeur des intensités pour les différentes périodes de retour, en mm/h à la station pluviométrique de TINDOUF.

Durée d(h)	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans
24 h	0.7	1.5	1.9	2.4	2.9	3
48 h	0.4	0 .8	1.1	1.3	1.7	1.7
72 h	0.3	0.6	0.8	1.0	1.2	1.2
96 h	0.2	0.5	0.6	0.7	0.9	1
120h	0.1	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9

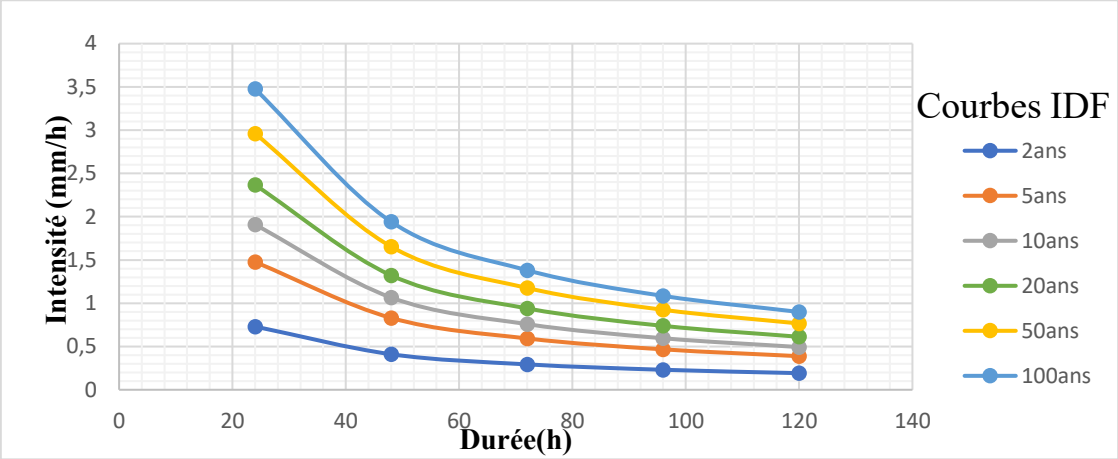


Figure VI-7:courbe intensité-durée-Fréquence (IDF).

VI.3.3 Les caractéristiques morphologiques des bassins versants :

VI.3.3.1 Notion 'Bassin versant' :

Un bassin versant est caractérisé comme une zone géographique délimitée par une ligne continue, constituée des points les plus hauts – la ligne de partage des eaux – qui capture et oriente toutes les eaux de précipitation, les infiltrations et les écoulements vers un unique exutoire, qu'il soit question d'un cours d'eau principale ou de ses affluents. Chaque goutte d'eau tombant sur ce territoire suit instinctivement le parcours défini par la topographie, convergeant vers ce point unique de drainage. Cette idée clé aide à saisir la dynamique des écosystèmes hydrologiques et elle est essentielle pour gérer les ressources en eau et prévenir les dangers associés aux crues et à l'érosion.

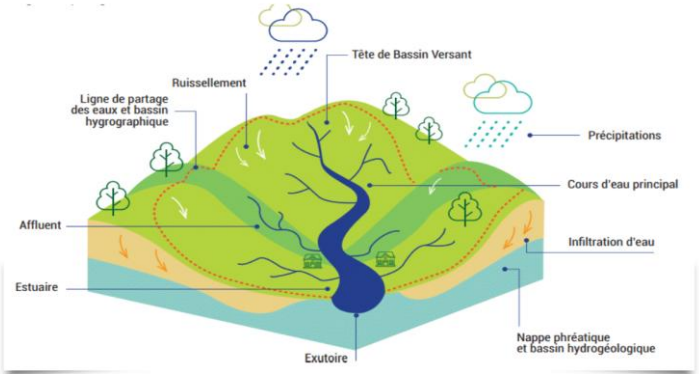


Figure VI-8: Schéma de principe d'un bassin versant. [29]

VI.3.3.2 Délimitation des bassins versant :

Le bassin versant fonctionne comme un réceptacle naturel, collectant les eaux de précipitation pour les acheminer vers un exutoire commun. Son comportement hydrologique est étroitement influencé par les conditions climatiques locales ainsi que par les particularités géomorphologiques du territoire concerné. Dans cette phase de l'étude, une délimitation précise des bassins versants intersectés par le tracé du projet a été réalisée, afin de mieux appréhender les écoulements de surface et anticiper les impacts hydrauliques liés à l'aménagement. Les résultats de cette délimitation sont présentés en **Annexe C**.

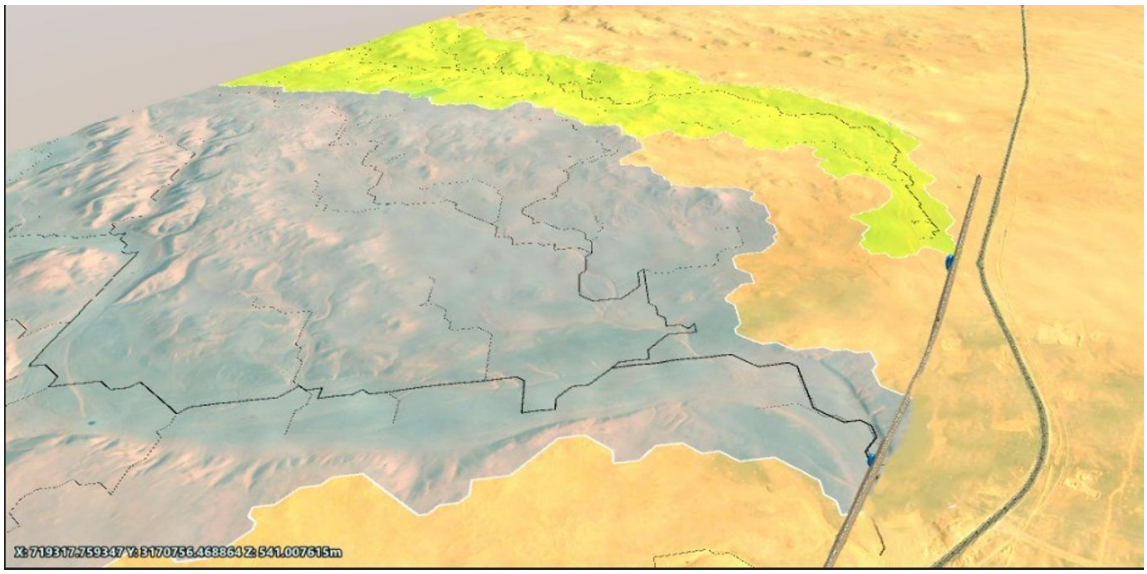


Figure VI-9 : Exemple de délimitation de deux bassins versants de notre tracé sur (InfraWorks).

Les paramètres suivants ont été déterminés :

- S (km²) : La surface du bassin versant.
- P (km) : Périmètre.
- L_W (km) : Longueur de talweg.
- H_{max} (m) : L'altitude max.

[29] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fdspace.univ-guelma.dz%2Fjspui%2Fbitstream%2F123456789%2F14751%2F1%2FZENATI_MOUIZ_F1.pdf&psig=AOvVaw0u2VDb766ukuGrLRm7K9SK&ust=1747759285842000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=2ahUKEwjFnq3s_K-NAxVMTUEAHdXbJmQQjRx6BAgAEBg

- H_{min} (m) : L'altitude min.
- H_{moy} (m) : L'altitude moyenne (m), avec $H_{moy} = \frac{H_{max}+H_{min}}{2}$.
- La pente moyenne I en (% ou en mm/mm) avec : $I=\frac{\Delta H}{L}$.
- K_c : Indice de compacité de Gravelius, avec : $K_c = \frac{0,28\times P}{\sqrt{S}}$.

Le tableau ci-dessous résume les propriétés des bassins versants des écoulements d'eau qui traversent la nouvelle ligne de chemin de fer Béchar-Gara Djebilet pour le tronçon PK618+000 a PK642+100 :

Tableau VI-8 : Caractéristiques morphométriques des bassins versants.

N° BV	PK	Surface de BV (Km²)	Périmètre B.V(Km)	Longueur de talweg (Km)	H_{max} (m)	H_{min} (m)	H_{moy} (m)	**ΔH(m)**	I (mm/mm)	K_c
1	618+150	11,120	22,650	10,534	606	542	574	64	0,0061	1,90
	618+875	11,120	22,650	11,100	606	540	573	66	0,0059	1,90
2	619+055	1,321	4,684	1,848	556	538	547	18	0,0098	1,14
3	619+775	100,400	58,786	25,870	637	538	587,5	99	0,0038	1,64
4	619+850	0,0317	1,007	0,379	540	536	538	4	0,0106	1,58
5	619+991	0,104	1,532	0,555	542	537	539,5	5	0,0090	1,33
6	620+134	0,713	3,845	1,467	553	537	545	16	0,0109	1,27
7	621+083	0,410	2,783	0,660	545	536	540,5	9	0,0136	1,22
8	621+450	0,481	3,724	1,485	554	536	545	18	0,0121	1,50
9	621+714	4,632	9,181	4,311	570	536	553	34	0,0079	1,19
10	622+033	14,518	22,840	11,270	604	537	570,5	67	0,0059	1,68
11	624+312	0,716	3,440	1,205	551	536	543,5	15	0,0124	1,14
12	624+963	0,240	2,153	0,730	547	538	542,5	9	0,0123	1,23
13	625+122	0,790	4,293	1,709	552	537	544,5	15	0,0088	1,35
14	625+472	2,026	6,304	2,476	557	536	546,5	21	0,0085	1,24
15	625+920	47,240	34,473	15,630	619	537	578	82	0,0052	1,40
16	626+928	0,490	2,754	1,126	551	540	545,5	11	0,0098	1,10
17	627+600	0,293	2,997	1,004	548	537	542,5	11	0,0110	1,55
18	627+850	0,178	2,754	0,709	546	537	541,5	9	0,0127	1,83
19	628+340	17,853	21,971	10,598	586	535	560,5	51	0,0048	1,46
20	629+920	2,743	7,496	2,765	551	531	541	20	0,0072	1,27
21	630+340	0,239	2,390	0,794	540	532	536	8	0,0101	1,37
22	631+240	68,249	51,778	25,154	634	534	584	100	0,0040	1,75
23	631+660	0,969	5,602	2,098	552	533	542,5	19	0,0091	1,59
24	632+050	0,747	5,137	2,200	554	534	544	20	0,0091	1,66
25	633+164	0,913	4,431	1,242	548	532	540	16	0,0129	1,30
26	633+782	4,166	3,260	1,109	545	528	536,5	17	0,0153	0,45
27	634+307	119,650	65,750	24,954	628	530	579	98	0,0039	1,68

	635+469	119,650	65,750	25,031	628	529	578,5	99	0,0040	1,68
28	636+136	1,420	7,454	3,422	555	527	541	28	0,0082	1,75
29	636+772	1,842	7,911	3,435	554	529	541,5	25	0,0073	1,63
30	637+956	12,458	19,547	10,000	586	525	555,5	61	0,0061	1,55
31	638+096	5,350	12,594	6,371	585	517	551	68	0,0107	1,52
32	640+863	2,313	6,793	2,624	534	518	526	16	0,0061	1,25
33	641+165	40,424	28,494	12,800	562	524	543	38	0,0030	1,25

VI.3.4 Calcul des débits maximaux (Les crues) :

La détermination du débit maximal d'un cours d'eau revêt une importance majeure en raison des impacts potentiellement dévastateurs des crues. Dans le cadre de la conception d'aménagements hydrauliques d'envergure, il est impératif de définir le débit de crue extrême auquel les ouvrages doivent être dimensionnés pour assurer leur protection. Cette crue est généralement caractérisée par son débit de pointe, sa durée, ainsi que le volume total écoulé. Pour l'estimation des débits maximaux aux points de franchissement critiques, des formules empiriques sont couramment utilisées. Celles-ci sont établies à partir des propriétés physiques spécifiques à chaque bassin versant, telles que la superficie, la pente, la nature du sol…etc.

Voici les formules :

VI.3.4.1 Formule rationnelle (10km²<S) :

La notion fondamentale de la formule rationnelle repose sur le fait que la pluie à l'origine d'une inondation est celle dont la durée correspond au temps de concentration.

La formule	Les paramètres
$\boldsymbol{Q_A = \frac{C.I.S}{3,6}}$	Q_A: le débit de crue de fréquence (m^3/s). C_r: coefficient de ruissellement. I : intensité de pluie de fréquence déterminée pour une durée égale au temps de concentration(mm/h). S : la surface du bassin versant (Km²).

- **Coefficient de ruissellement C_r:**

Le coefficient de ruissellement correspond à la part du ruissellement d'eau par rapport aux précipitations totales survenus dans les bassins versants. Pour établir le coefficient de ruissellement Cr, nous avons choisi d'adopter la méthode de KENESSEY : $\boldsymbol{Cr}$=$\boldsymbol{C1}$+$\boldsymbol{C2}$+$\boldsymbol{C}$3
Tel quel : $\boldsymbol{Cr}$: Coefficient de ruissellement.

- **Choix de Coefficient de ruissellement :**

Il se détermine en prenant en considération trois paramètres à savoir l'inclinaison du cours d'eau majeure, la perméabilité du sol et la végétation du bassin versant.

Dans notre projet $\boldsymbol{C_r = 0,53.}$

- **Le temps de concentration Tc :**

Il s'agit du temps qu'une goutte d'eau met pour descendre du point le plus haut du bassin versant jusqu'à l'exutoire. Ce délai est déterminé par les formules ci-après, qui diffèrent en fonction de la surface du bassin versant :

Formule	T_c (h)	Surface Km²	Paramètres
Kirpich	$T_C = \frac{0{,}0195 \times L^{0,77}}{I^{0,385}}$	0.004 Km² <S<0.81 Km²	I [m/m] : pente moyenne du bassin versant. Lw [m] : longueur du cours d'eau principal.
Ventura	$T_C = 0.127 \times \sqrt{\frac{S}{I}}$	**S<5** Km²	S [Km²] : superficie du bassin versant. I [m/m] : pente moyenne du bassin versant.
Passini	$T_C = 0.108 \times \frac{\sqrt[3]{S \times L_W}}{\sqrt{I}}$	5 Km² <S<25 Km²	S [Km²] : superficie du bassin versant. I [m/m] : pente moyenne du bassin versant. Lw [Km] : longueur du cours d'eau principal.
Giandotti	$T_C = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L_W}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$	S>25 Km²	S [Km²] : superficie du bassin versant. I [m/m] : pente moyenne du bassin versant. Lw [Km] : longueur du cours d'eau principal. H_{moy}[m] : L'altitude moyenne. H_{min} [m] : Altitude minimale.

VI.3.4.2 Formule de Crupédix (50km²<S<100km²) :

La formule	Les paramètres
$\boldsymbol{Q = Q_{10} = R \times (\frac{P_{j_{max}(10)}}{80})^2 \times S^{0,8}}$	Q_{10} : Débit de crue instantané de fréquence décennale. en (m^3/s). R : Coefficient régional traduisant l'aptitude au ruissellement. R=2 pour les terrains perméables. R=1.5 à 1.8 pour les terrains imperméables. R= 1 pour les terrains intermédiaires. $\boldsymbol{P_{j_{max}(10)}}$: pluie journalière maximum décennale (mm). S : surface du bassin versant (km²).
Évaluation du débit QT de période de retour T :	On peut obtenir une estimation d'un débit avec un retour de période T situé entre 10 et 100 ans en utilisant la formule ci-dessous, sous l'hypothèse que la distribution statistique des valeurs observées suit la loi de Gumbel : $\boldsymbol{Q_T = Q_{10} + \Delta Q\left(\frac{Y}{2,3} - 1\right)}$ **Avec :** Q_{10} : Débit de crue instantané de fréquence décennale en (m^3/s) (calculer par la formule de **Crupédix**). $\boldsymbol{\Delta Q}$:Résulte de la différence entre les débits décennal et centennal calculés par la formule rationnelle (R) pour le même bassin : $\boldsymbol{\Delta Q : Q_{r100} - Q_{r10}}$ $\boldsymbol{Y}$: calcule selon l'equation: $\boldsymbol{y = (-ln\left(-ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right))}$

VI.3.4.3 Formule de transition (10km²<S<50km²) :

La formule	Les paramètres
$Q_{100} = \propto \times Q_{RT} + \beta \times Q_{CT}$	Q_T : Débit de crue de fréquence en (m^3/s). α et β : Coefficients de pondération. $\alpha = \frac{50 - S}{40}$ et $\beta = 1 - \alpha$ α : varie linearment entre 0 et 1. Q_{RT};Débit fournie par la formule rationnelle. Q_{CT}; Débit fournie par la formule Crupedix.

VI.3.4.4 Formule Mallet et Gauthier (S>100km²) :

La formule	Les paramètres
$Q_{100} = 2 \times k \times \log(1 + a \times P) \times \frac{S}{\sqrt{L}} \times \sqrt{(1 + 4logT - logs)}$	Q_{100} : le débit de crue de période de retour voulue (m^3/s). k : paramètre (facteur pluviométrique considéré dans sa variabilité compris entre 0.5 et 5. P : précipitation Moyenne interannuelle (m). a : paramètre (facteur pluviométrique considéré moyennement) qui varie de 20 à 30. (« a » est pris égale à 25 S : surface du bassin versant (km²). L : longueur du talweg principale (km). T : période de retour en année (ans).(T=100ans)

- Les résultats de calcule des débits centennaux maximaux sont récapitule dans les tableaux ci-dessous :

Tableau VI-9 : Les débits maximaux centennaux des oueds.

N° BV	PK	Surface de BV (Km²)	Cr	Tc (h)	I(T,Tc) (mm/h)	Q_{100} (m^3/s)				$Q_{100_{retenu}}$
						Rationnelle	Transition	Crupedix	Mallet – Gautier	
1	618+150	11,120	0,53	6,905	9,90	-	16,063	-	-	16,063
	618+875	11,120	0,53	7,103	9,67	-	15,688	-	-	15,688
2	619+055	1,321	0,53	1,474	36,22	7,043	-	-	-	7,043
3	619+775	100,400	0,53	14,015	5,46	-	-	-	74,565	74,565
4	619+850	0,0317	0,53	0,220	178,98	0,835	-	-	-	0,835
5	619+991	0,104	0,53	0,432	101,54	1,555	-	-	-	1,555
6	620+134	0,713	0,53	1,027	49,06	5,150	-	-	-	5,150
7	621+083	0,410	0,53	0,696	68,02	4,106	-	-	-	4,106
8	621+450	0,481	0,53	0,800	60,51	4,285	-	-	-	4,285
9	621+714	4,632	0,53	3,078	19,51	13,306	-	-	-	13,306
10	622+033	14,518	0,53	7,803	8,93	-	18,45	-	-	18,45
11	624+312	0,716	0,53	0,963	51,78	5,459	-	-	-	5,459
12	624+963	0,240	0,53	0,560	81,65	2,885	-	-	-	2,885
13	625+122	0,790	0,53	1,205	42,90	4,989	-	-	-	4,989
14	625+472	2,026	0,53	1,963	28,47	8,492	-	-	-	8,492

15	625+920	47,240	0,53	9,944	7,29	-	36,247	-	-	36.247
16	626+928	0,490	0,53	0,899	54,86	3,958	-	-	-	3,958
17	627+600	0,293	0,53	0,657	71,40	3,080	-	-	-	3,080
18	627+850	0,178	0,53	0,476	93,60	2,453	-	-	-	2,453
19	628+340	17,853	0,53	9,103	7,85	-	19,517	-	-	19,517
20	629+920	2,743	0,53	2,473	23,45	9,470	-	-	-	9,470
21	630+340	0,239	0,53	0,619	75,06	2,641	-	-	-	2,641
22	631+240	68,249	0,53	12,512	6,01	-	-	43.811	-	43.811
23	631+660	0,969	0,53	1,314	39,89	5,690	-	-	-	5,690
24	632+050	0,747	0,53	1,151	44,58	4,903	-	-	-	4,903
25	633+164	0,913	0,53	1,069	47,44	6,376	-	-	-	6,376
26	633+782	4,166	0,53	2,094	26,97	16,539	-	-	-	16,539
27	634+307	119,650	0,53	14,497	5,31	-	-	-	89,984	89,984
	635+469	119,650	0,53	14,444	5,32	-	-	-	89,846	89,846
28	636+136	1,420	0,53	1,673	32,56	6,807	-	-	-	6,807
29	636+772	1,842	0,53	2,020	27,79	7,537	-	-	-	7,537
30	637+956	12,458	0,53	7,034	9,75	-	17,532	-	-	17,532
31	638+096	5,350	0,53	3,389	18,00	14,175	-	-	-	14,175
32	640+863	2,313	0,53	2,474	23,44	7,982	-	-	-	7,982
33	641+165	40,424	0,53	12,799	5,89	-	28,730	-	-	28,730

VI.4 Calcul hydraulique :

L'étude hydraulique a pour objectif d'éviter les impacts négatifs de l'eau sur les infrastructures ferroviaires, grâce à la gestion maîtrisée du drainage des eaux de pluie et souterraines. Elle offre la possibilité de concevoir un système d'assainissement performant, comprenant des structures longitudinales (fossés), transversales (dalots, buses, ponts et viaducs), et de raccordement (regards de visites, raccordement [buses-regard, buses-fossés, …], assurant la stabilité de la plateforme et la sûreté du parcours ferroviaire. Cette analyse est essentielle pour évaluer adéquatement les ouvrages hydrauliques et maintenir la pérennité de l'infrastructure.

VI.4.1 Dimensionnent des ouvrages transversaux :

Les ouvrages de drainage transversaux sont essentiels pour garantir le flux continu des cours d'eau naturels, en offrant aux eaux de ruissellement la possibilité de traverser les infrastructures ferroviaires sans affecter leur stabilité. Ils sont conçus pour assurer que, même lors de fortes pluies, le débit produit (débit de saturation) ne dépasse pas la capacité maximale que l'infrastructure peut tolérer. On utilise la formule de **Manning-Strickler** pour évaluer cette capacité, celle-ci permet de déterminer le débit admissible en se basant sur les spécificités de l'infrastructure. Le but est de prévenir toute saturation en cas d'événements climatiques extrêmes.

Formule	Paramètres
$Q_S = K_S \times S_m \times R_h^{2/3} \times \sqrt{I}$	K_S: coefficient de rugosité, pour le béton $K_S = 70$. R_h; rayon hydraulique. S_m: section mouillé. I : la pente longitudinale de l'ouvrage (m/m).

VI.4.1.1 Les buses :

le dimensionnement des buses s'effectue en recourant à la formule de Manning-Strickler, où l'on établit l'équilibre entre le débit d'apport et la saturation :

Prédimensionnement :

$$Q_S = Q_{max}$$

Avec : $S_m = \pi \frac{D^2}{4}$ *et* $R_h = \frac{D}{4}$

Donc : $D = 4^{5/8} \left(\frac{Q_{max(100)}}{K_S \times \pi \times \sqrt{I}}\right)^{3/8}$

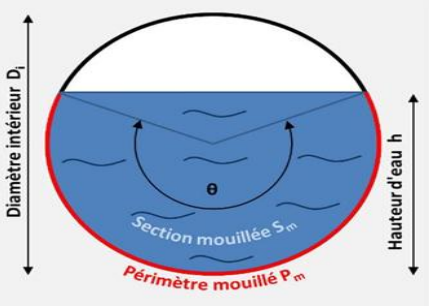


Figure VI-10: schéma d'une buse.

La vérification des conditions d'auto-curage :

- Condition 1 : La vitesse d'écoulement V > 1.00 m/s et ne dépasse pas 4.00 m/s.
- Condition 2 : Soit la vitesse d'écoulement calculée comme précédemment, à partir de Q=0.1Q_{PS} ➔ V > 0.6 m/s.
- Condition 3 : Soit la vitesse d'écoulement calculée comme précédemment, à partir de Q=0.01Q_{PS} ➔ V > 0.3 m/s

Application numérique : Pour le bassin versant N°07 : On prend $K_S = 70$ et I=0,01(m/m)

On a: $Q_S = Q_{max} = 4{,}106\, m^3/s$ $D = 4^{5/8}\left(\frac{Q_{max(100)}}{K_S \times \pi \times \sqrt{I}}\right)$=1,2675m

Alors : on choisit un diamètre commercial de 1,50m

$$\begin{cases} débit\ à\ section\ pleine: Q_{PS} = K_S \times S_m \times R_h^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I} = \frac{6{,}432 m^3}{s} \\ vitesse\ à\ pleine\ section: V_{PS} = \frac{Q_{PS}}{Sm} = 3{,}64 m/s \\ \text{rapport de des débits : } R_q = \frac{Q_{max}}{Q_{PS}} = 0{,}638 \end{cases}$$

D'après tableau en annexe C : Rapport des vitesses et des hauteurs ont été retenus :

$$\begin{cases} rapport\ des\ vitesses: R_v = 1{,}058 \rightarrow \text{la vitesse d'écoulement: } V = R_v \times V_{PS} = 3{,}85 m/s \\ rapport\ des\ hauteurs : R_h = 0{,}581 \rightarrow \text{hateur de remplissage : } H = R_h \times D = 0{,}871 m < 0.8 * D = 1.2 m \end{cases}$$

Le tableau suivant démontre la vérification des conditions d'auto-curage pour l'ouvrage busé bassin versant N°4 :

Les conditions	Les vérifications	R_q	R_v	V
1	1m/s<V<4m/s	0,638	1,058	3,23
2	Q=0.1Q_{PS} →V>0 .6m/s	0.1	0.638	2.32
3	Q=0.01Q_{PS} →→V>0 .3m/s	0.01	0.32	1.16

- Les conditions d'auto-curage du BV N°4 sont vérifiées.

Tableau VI-10 : Calculs récapitulatifs des ouvrages busés de notre projet Vérifications des conditions d'auto-curage.

N° BV	PK	Q_{100} (m^3/s)	I %	Ks	D_{theo} (mm)	Dimension de l'ouvrage			Qs	Vps	Rq	Rv	V	Rh	H_{rempli}	Condition d'auto-curage		
						Type	Nombre	Ø								1m/s< V<4m /s	V>0 .6 m/s	V>0 .3 m/s
2	619+055	7,043	70	0,010	1,552159	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,547	1,021	3,71	0,528	0,792	3,71	2.32	1.16
4	619+850	0,835	70	0,010	0,697685	Buse	1	1500	6,432	3,64	0,129	0,689	2,51	0,243	0,364	2,51	2.32	1.16
5	619+991	1,555	70	0,010	0,880899	Buse	1	1500	6,432	3,64	0,242	0,821	3,00	0,334	0,501	3,00	2.32	1.16
6	620+134	5,150	70	0,010	1,380241	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,400	0,944	3,44	0,43	0,660	3,44	2.32	1.16
7	621+083	4,106	70	0,010	1,267825	Buse	1	1500	6,432	3,64	0,638	1,058	3,85	0,581	0,871	3,85	2.32	1.16
8	621+450	4,285	70	0,010	1,288275	Buse	1	1500	6,432	3,64	0,666	1,069	3,80	0,597	0,895	3,80	2.32	1.16
11	624+312	5,459	70	0,010	1,410732	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,424	0,959	3,50	0,455	0,682	3,50	2.32	1.16
12	624+963	2,885	70	0,010	1,110662	Buse	2	1500	6,432	3,64	0,444	0,970	3,53	0,466	0,700	3,53	2.32	1.16
13	625+122	4,989	70	0,010	1,363899	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,387	0,935	3,40	0,431	0,650	3,40	2.32	1.16
14	625+472	8,492	70	0,010	1,664968	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,660	1,067	3,88	0,594	0,891	3,88	2.32	1.16
16	626+928	3,958	70	0,010	1,250491	Buse	1	1500	6,432	3,64	0,614	1,049	3,81	0,566	0,850	3,81	2.32	1.16
17	627+600	3,080	70	0,010	1,138239	Buse	1	1500	6,432	3,64	0,478	0,988	3,60	0,487	0,730	3,60	2.32	1.16
18	627+850	2,453	70	0,010	1,045114	Buse	1	1500	6,432	3,64	0,381	0,932	3,40	0,428	0,642	3,40	2.32	1.16
21	630+340	2,641	70	0,010	1,074460	Buse	1	1500	6,432	3,64	0,411	0,952	3,46	0,447	0,670	3,46	2.32	1.16
23	631+660	5,690	70	0,010	1,432829	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,442	0,959	3,50	0,454	0,680	3,50	2.32	1.16
24	632+050	4,903	70	0,010	1,355034	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,381	0,932	3,40	0,428	0,640	3,40	2.32	1.16
25	633+164	6,376	70	0,010	1,495315	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,496	0,998	3,63	0,498	0,750	3,63	2.32	1.16
28	636+136	6,807	70	0,010	1,532447	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,529	1,013	3,69	0,517	0,770	3,69	2.32	1.16
29	636+772	7,537	70	0,010	1,592123	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,585	1,038	3 ,78	0,550	0,820	3 ,78	2.32	1.16
32	640+863	7,982	70	0,010	1,600384	Buse	2	1500	12,864	3,64	0,621	1,052	3,83	0,571	0,856	3,83	2.32	1.16
													H_{rempli} <0,8D : vérifié			vérifié	vérifié	vérifié

VI.4.1.2 Les dalots :

sont des structures ayant une section rectangulaire ou carrée, et elles sont uniquement réalisées en béton armé. Ils se composent d'un radier, de deux murs et d'une dalle. Ils possèdent un pouvoir d'évacuation de débits plus importants que celui des buses, désignés par la largeur (B) et la hauteur (H). le dimensionnement implique de définir la section et la hauteur d'eau utile du dalot, tout en tenant compte d'un taux de remplissage de 0,75 H. Cette démarche repose sur l'équation de Manning-Strickler, et vise à trouver un équilibre entre ntre le débit d'apport et la saturation :

Prédimensionnement :

$$Q_S = Q_{max}$$

Avec : $S_m = b \times h$ et $P_m = b + 2 \times h$

$$R_h = \frac{h \times b}{b + 2h}$$

L'évaluation est effectuée par itérations, pour un taux de remplissage H = 0.75 h :

$S_m = 0{,}75 \times H \times B$ *et* $R_h = \frac{0{,}75 \times H \times B}{B + 1{,}5H}$

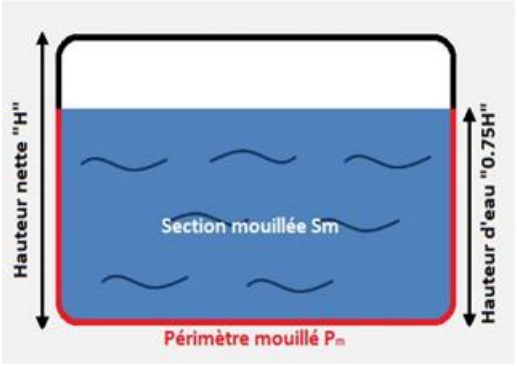


Figure VI-11: schéma d'un dalot.

$$Q_{max} = K_S \times S_m \times R_h^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I} = 70 \times 0{,}75 \times H \times B \times \left(\frac{0{,}75 \times H \times B}{B + 1{,}5H}\right)^{2/3} \times \sqrt{I}$$

$$H_{i+1} = \left[\frac{Q_{max}}{K_S \times \sqrt{I}}\right]^{\frac{3}{5}} \times \frac{(B + 1{,}5H_i)^{\frac{2}{5}}}{0{,}75B} \qquad \text{Avec } H_0 = \left[\frac{Q_{max}}{K_S \times \sqrt{I}}\right]^{\frac{3}{5}}$$

Le critère d'arrêt $H_{i+1} - H_i < 10^{-3}$

➢ **Application numérique :**

Pour le bassin versant N°09 :

On prend $K_S = 70$, I=0,005(m/m) B= 3m

On a: $Q_S = Q_{max} = 13{,}306\, m^3/s$

Après le calcul itératif de l'équation précédente on obtient : H = 1.65 m

On prend : H=2m

Donc les dimensions de dalot : B=3m et H=2m.

$$\begin{cases} S_m = 4{,}5m^2 \; ; \; P_m = 6m \; ; R_h = 0{,}77 \\ \text{débit à section pleine}: Q_{PS} = K_S \times S_m \times {R_h}^{2/3} \times \sqrt{I} = 70 \times (4{,}5) \times (0{,}75)^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{0{,}005} = 18{,}38/\text{s} \\ \text{vitesse à pleine section}: V_{PS} = \frac{Q_{PS}}{Sm} = \frac{18{,}38}{4{,}5} = 4.08m/S \\ \text{On utlise dalot a deux cellule :} \\ \text{rapport de des débits} : R_q = \frac{Q_{max}}{Q_{PS}} = \frac{13{,}408}{18{,}38} = 0{,}709 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Rightarrow \textbf{Vérification de la vitesse :} \\ V_{Saturation} = \frac{Q_{max}}{Sm} = \frac{13{,}306}{4{,}5} = 2{,}95 < \frac{4\text{m}}{\text{s}} \rightarrow \text{condition de Vitesse : verifié.} \\ \Rightarrow \textbf{Vérification de la condition pour assurer un écoulement fluvial :} \\ H_C = \sqrt[3]{\frac{Q_{PS}}{g \times b^2}} = 0{,}61m < 0{,}75 \times H = 1{,}5m \rightarrow \text{condition de régime fluviale: verifié.} \end{cases}$$

Le tableau suivant démontre la vérification des conditions d'auto-curage pour l'ouvrage busé bassin versant N°11 :

Les conditions	Les vérifications	R_q	R_v	V
1	1m/s<V	0,709	1.084	4,42
2	Q=0.1Q_{PS} →V>0 .6m/s	0.1	0.638	2.60
3	Q=0.01Q_{PS} →→V>0 .3m/s	0.01	0.32	1.30

- Les conditions d'auto-curage du BV N°8 sont vérifiées.

Tableau VI-11 : Tableau récapitulatif des dimensions des dalots avec les vérifications des conditions d'auto-curage.

N° BV	PK	Q_{100} (m^3/s)	I (m/m)	Ks	Dimension de l'ouvrage			$Q_{ps}>Q_{100}$ (m/s)	Vps	Vsat	Hc	Vérification des conditions d'auto-curage		
					type	Nombre	$B \times H$					V>1m/s	V>0,6m/s	V>0,3m/ s
1	618+150	16,063	70	0,005	dalot	1	3*2	18,38	4,08	3,57	0,610	4,60	2,61	1,30
	618+875	15,688	70	0,005	dalot	1	3*2	18,38	4,08	3,48	0,610	4,58	2,61	1,30
3	619+775	74,565	70	0,005	dalot	5	3*2	91,90	4,08	3,31	0,610	4,37	2,61	1,30
9	621+714	13,306	70	0,005	dalot	1	3*2	18,38	4,08	2,95	0,610	4,42	2,61	1,30
10	622+033	18,45	70	0,005	dalot	2	3*2	36,76	4,08	2,05	0,610	4,08	2,61	1,30
15	625+920	36.247	70	0,005	dalot	3	3*2	55,14	4,08	2,68	0,610	4,36	2,61	1,30
19	628+340	19,517	70	0,005	dalot	2	3*2	36,76	4,08	2,17	0,610	4,14	2,61	1,30
20	629+920	9,470	70	0,005	dalot	1	3*2	18,38	4,08	2,10	0,610	4,11	2,61	1,30
22	631+240	43.811	70	0,005	dalot	4	3*2	80,12	4,08	2,44	0,610	4,24	2,61	1,30
26	633+782	16,539	70	0,005	dalot	1	3*2	18,38	4,08	3,67	0,610	4,61	2,61	1,30
27	634+307	89,984	70	0,005	dalot	6	3*2	110,28	4,08	3,33	0,610	4,55	2,61	1,30
	635+469	89,846	70	0,005	dalot	6	3*2	110,28	4,08	3,32	0,610	4,54	2,61	1,30
30	637+956	17,532	70	0,005	dalot	2	3*2	36,76	4,08	3,89	0,610	4,02	2,61	1,30
31	638+096	14,175	70	0,005	dalot	1	3*2	18,38	4,08	3,15	0,610	4,50	2,61	1,30
33	641+165	28,730	70	0,005	dalot	2	3*2	36,76	4,08	3,19	0,610	4,51	2,61	1,30
								$Q_{ps}>Q_{100}$ Vérifié	Vsat<4m/s Vérifié		Hc<0,75 × H Vérifié	Vérifié	Vérifié	Vérifié

VI.4.2 Dimensionnent des ouvrages longitudinaux :

Les eaux de ruissellement en provenance des talus et terrains adjacents sont collectées et dirigées vers la plateforme ferroviaire par un dispositif de drainage longitudinal, assuré par des fossés implantés à des niveaux appropriés. Ces derniers orientent les écoulements vers les ouvrages hydrauliques prévus ou les lignes d'eau existantes.

L'analyse des surfaces à drainer a été menée à partir des profils en travers et des caractéristiques topographiques du terrain naturel concerné par le projet. Le dimensionnement des fossés repose sur les hypothèses suivantes :

- En zones de déblai, la pente des fossés suit celle du profil en long, avec un tracé trapézoïdal et une inclinaison des talus de H/**V (1 :1) .**
- Le débit à évacuer, noté **Qa**, résulte de la somme des apports de la plateforme (**Qpf**) et des talus (**Qt**) : **Qa = Qpf + Qt**
- Les cas les plus défavorables sont pris en compte, notamment ceux impliquant des remblais ou déblais de grande longueur et de hauteur importante.
- Chaque débit est déterminé en utilisant la méthode rationnelle :

La formule	Paramètre
Q=0.278*Cr*I*A	Q : débits de crue correspondant au bassin versant, avec une période de retour T(m3/s). C : le coefficient de ruissèlement. I : l'intensité de pluie (mm/h). A : la surface du BV considérer : la plateforme/le talus (Km².)

VI.4.2.1 Les fossés :

On peut déterminer le calcul hydraulique des fossés par la formule de Manning Strickler :

La formule	Les paramètres
$Q_S = K_S \times S_m \times {R_h}^{2/3} \times \sqrt{I}$	K_S: coefficient de rugosité, pour le béton $K_S = 70$ $R_h = S_m/P_m$ $S_m = (b + z * h) * h$ $P_m = b + 2h\sqrt{1+z^2}$ Avec : z est la pente des berges.

- **Application sur notre projet :**

Le dimensionnement des systèmes de drainages longitudinaux est calculé pour une période de retour de 10 ans. (a= 27.54et b=0.84).

Tableau VI-12: Les caractéristiques du remblai et déblai.

Cas	Cas Remblai	Cas Remblai
PK	627+175	629+075
Longueur (m)	1893.74	552.7
Hauteur du talus (m)	7.90	4.97

➢ **Calcul du débit :**

Plateforme						
Cas	**Cr**	**P(m/m)**	**A(Km2)**	**Tc(h)**	**I(mm/h)**	**Qpf(m^3/s)**
Remblai	**0.9**	**0.04**	**0.012877**	**0.072**	**251.076**	**0.78**
Déblai	**0.9**	**0.04**	**0.00375**	**0.038**	**429.482**	**0.42**
Talus						
Remblai	**0.7**	**0.67**	**0.015102**	**0.078**	**234.749**	**0 .68**
Déblai	**0.7**	**0.67**	**0.009931**	**0.063**	**280.878**	**0.52**
Qtot(m3/s)	**Remblai : 1,2m^3/s Déblai :0.94m^3/s**					

Les dimensions des fossés ont été choisies en fonction des conditions suivantes :

- **Qtot<Qs**

➢ Dimensionnement du fossé :

$h = (\frac{Q}{Ks*b*\sqrt{I}})^{3/5} \times (\frac{b+2*h*\sqrt{1+z^2}}{b+z*h})^{3/5}$, avec Q= Qtot

Tableau VI-13:Les dimensions du fossé.

B	H	Z	Sm	Pm	Rh	Ks	I	Q
0.5	0.5	1.5	0.625	2.032	0.307	70	0.01	2.235

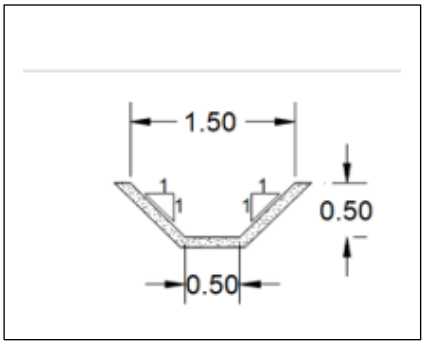


Figure VI-12 : Le faussée trapézoïdal de notre projet

VI.5 Conclusion :

Ce chapitre a porté sur l'analyse hydrologique et hydraulique, élément fondamental pour garantir la stabilité et la sécurité du projet. Il a permis d'évaluer les caractéristiques des bassins versants, d'estimer les débits d'écoulement, et de dimensionner les ouvrages hydrauliques transversaux et longitudinaux. À travers cette étude, les notions acquises au cours de notre formation, notamment en hydraulique appliquée , ont été mises en pratique. Elle a également mis en évidence l'importance d'une approche méthodique dans le dimensionnement des ouvrages, afin de limiter les risques d'inondation et d'assurer la fiabilité et la durabilité de l'infrastructure ferroviaire, conformément aux normes en vigueur.

CHAPITRE VII

ÉTUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

CHAPITRE VII. ÉTUDE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE :

VII.1 Introduction :

Les études géologiques et géotechniques sont indispensables à la conception des infrastructures ferroviaires, notamment dans des régions complexes comme celle de Tindouf. Elles permettent de caractériser avec précision les types de sols et les formations rocheuses rencontrés le long du tracé, afin de garantir un dimensionnement fiable de la plateforme ferroviaire ainsi que des fondations des ouvrages d'art et des bâtiments associés. Ces investigations visent également à identifier les risques géotechniques potentiels tels que les tassements, glissements ou phénomènes d'ensablement éolien, et à proposer des solutions techniques appropriées assurant la stabilité, la sécurité et la durabilité des structures. Bien que les normes algériennes soient les principales références, les principes de l'Eurocode 7 (EN 1997) peuvent être utilisés à titre complémentaire pour renforcer la rigueur des analyses et des choix de conception.

VII.2 Étude Géologique :

VII.2.1 Situation géographique :

Le tracé du projet Béchar – Tindouf se situe dans le sud-ouest de l'Algérie, traversant les wilayas de Béchar et de Tindouf. La zone spécifique de notre projet d'étude se trouve dans la wilaya de Tindouf, délimitée au nord par le Royaume du Maroc, à l'ouest par le territoire du Sahara occidental, à l'est par la wilaya d'Adrar, au sud par la République Islamique de Mauritanie, et au nord-est par la wilaya de Béchar. Couvrant une superficie d'environ 159 000 km².

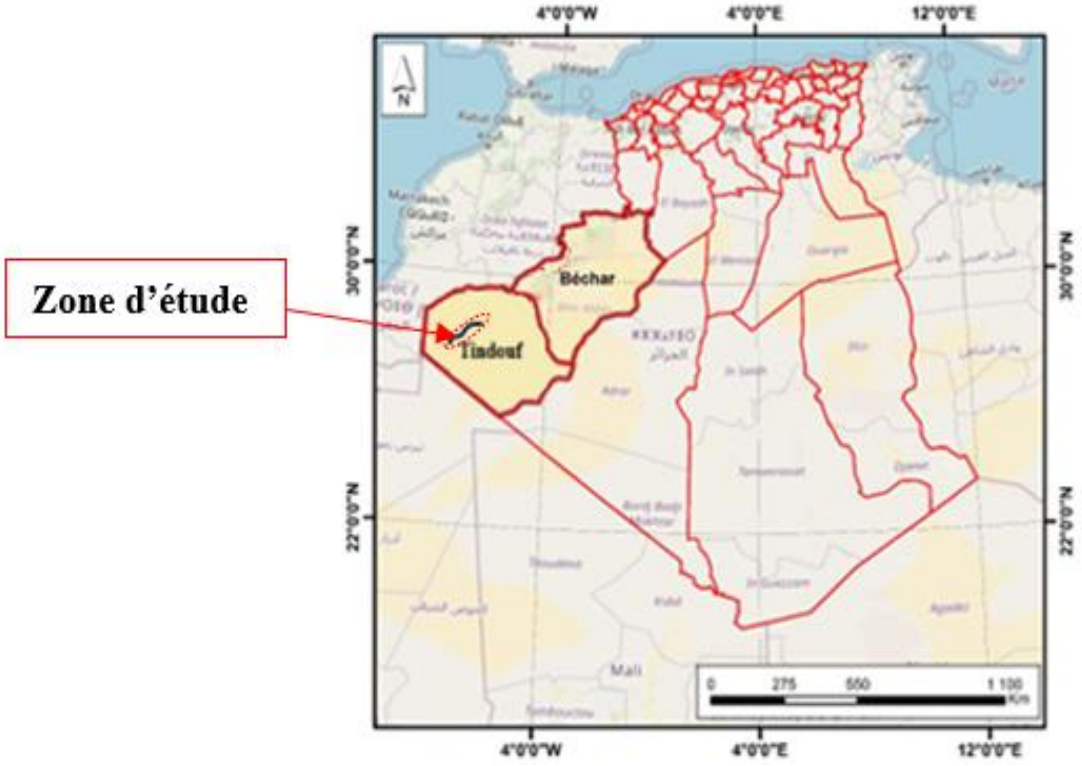


Figure VII-1: Situation administrative pour notre tracé d'étude.

VII.2.2 Formes géomorphologiques :

Vers le nord, notre tracé longe les versants orientaux du djebel Ouarkziz près d'Oum El Assel, formant un arc calcaire qui se présente comme une cuesta[30] inclinée vers le sud, caractérisée par des ravins et des passages étroits dirigeant les eaux vers l'oued Draa, avec une seconde cuesta moins proéminente séparée par une dépression est-ouest creusée dans des marnes gypseuses; l'étude s'inscrit dans un ensemble désertique dominé par des hamadas[31] aux surfaces plates ou légèrement ondulées qui s'étendent entre le piémont de l'Atlas au nord-est et le massif de Yetti au sud-ouest, traversant principalement la Hamada de Tindouf, ponctuée de dépressions caractéristiques (sebkhas[32]) comme celles de Tindouf et d'Ain Belbela qui constituent des points bas au sein du relief.

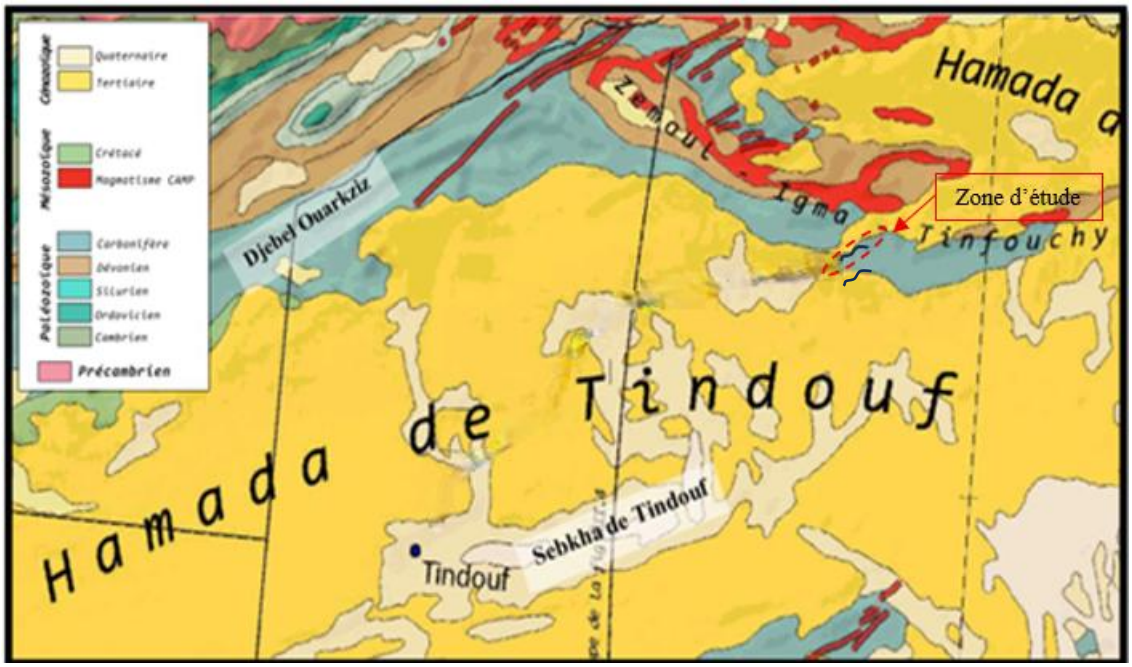


Figure VII-2 : Carte géologique des formes géomorphologiques.

VII.2.3 Aperçu sismique :

Selon l'**Annexe A** du RPA 2024, la **wilaya de Tindouf**, où se situe notre zone d'étude, est classée en **Zone 0**, correspondant à une sismicité très faible considérés comme négligeables.

[30] Cuesta : formation géologique en forme de pente asymétrique, caractérisée par un versant raide (escarpement) et un versant doux, résultant de l'érosion différentielle de couches rocheuses inclinées.

[31] Hamadas : zones désertiques rocheuses, plates ou légèrement ondulées, recouvertes de pierres ou de roches, sans sable.

[32] Sebkhas : zones plates et salées, souvent inondées temporairement, où l'eau s'évapore et laisse des dépôts de sel.

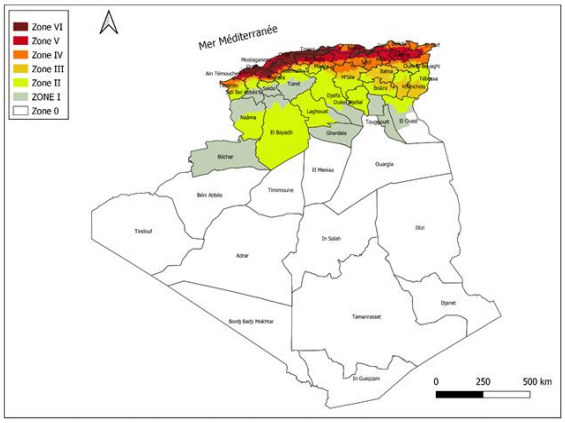


Figure VII-3 : Carte de zonage sismique selonRPA 2024.

VII.2.4 Cadre géologique général :

Le bassin de Tindouf se situe à l'extrême ouest de la plate-forme saharienne et constitue une vaste dépression orientée Est-Ouest, s'étendant sur une superficie supérieure à 130 000 km². Il est délimité par les structures géomorphologiques suivantes :

- À l'Est et au Nord-Est **:** l'ensellement de Krettamia Bou Bernous et les monts de l'Ougarta, qui marquent la transition vers les hauts reliefs sahariens ;
- À l'Ouest **:** les frontières algériennes avec le Maroc et la République Arabe Sahraouie Démocratique (RASD) ;
- Au Nord **:** l'Anti-Atlas marocain, qui représente une limite structurale majeure ;
- Au Sud **:** le massif cristallin des Reguibat, socle précambrien affleurant.

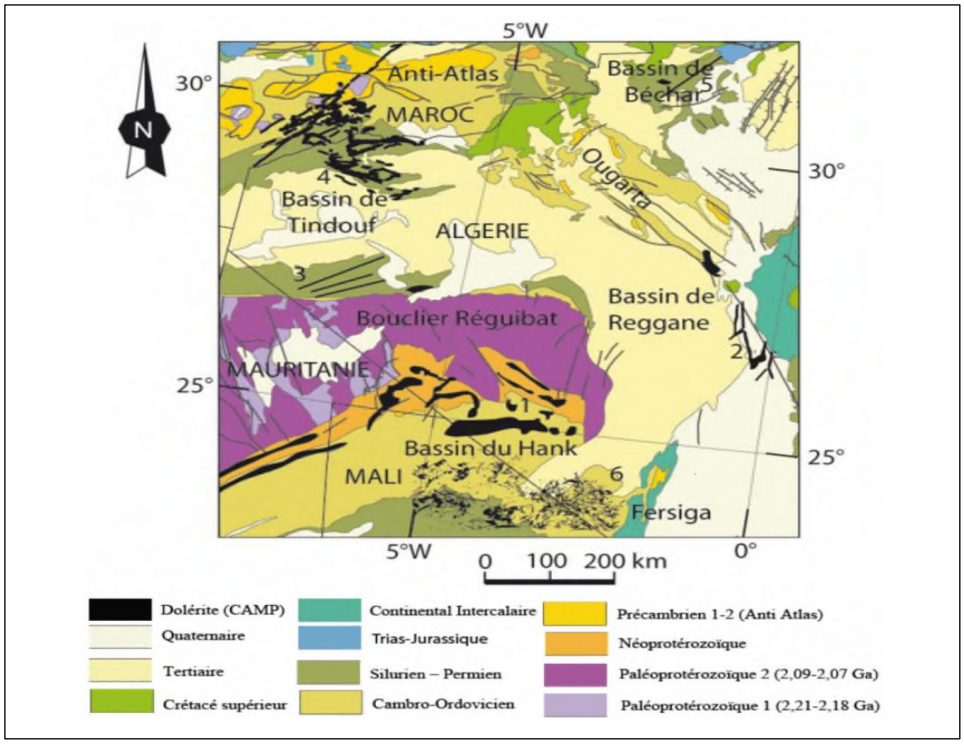


Figure VII-4 : Carte géologique de notre zone d'étude.[33]

[33]https://www.researchgate.net/profile/MoulleyChabou/publication/314384738/figure/fig1/AS:469970963439616@1489061217062/Carte-geologique-du-sud-ouest-algerien-dapres-la-carte-geologique-de-lAfrique-au.png

VII.2.5 Caractérisation Géologique du Secteur d'Étude :

Le tracé du projet traverse des formations géologiques quaternaires, notamment des dépôts alluvionnaires récents déposés dans les chenaux de drainage actifs. Les investigations menées par forages, ont révélé une stratigraphie relativement homogène constituée de deux niveaux principaux.

- Un niveau supérieur : constitué d'une alternance de calcaire et de sable rougeâtre, présent entre 0,00 m et 5,00 à 7,00 m de profondeur selon les forages., représentant des dépôts meubles à compacité variable.
- Un niveau inférieur : composé de calcaire dur ou altéré blanchâtre, vraisemblablement rattaché à la dalle calcaire de la Hamada de Tindouf, présent entre 5,00 m et 10,00 m de profondeur.

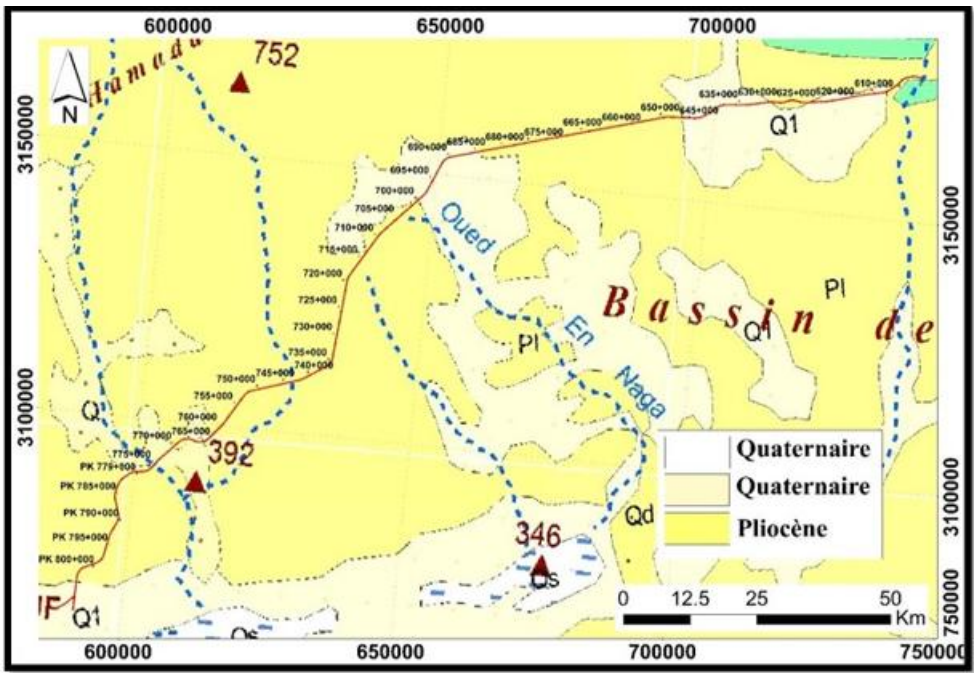


Figure VII-5 : Carte géologique (source ASGA-Echelle 1/2100000ème).

VII.3 Étude géotechnique :

VII.3.1 Programme d'investigation géotechnique :

Le programme d'investigations géotechniques proposé pour ce projet se résume en :

- **Puits de reconnaissance (profondeur de 3 à 4 m)** : ils permettent d'identifier la nature des sols selon les classifications GTR et UIC, et de vérifier la présence de la nappe phréatique.
- **Essais de pénétration dynamique lourd :** destinés à évaluer la compacité, la consistance et la résistance dynamique des sols.
- **Sondages carottés :** réalisés pour les études de stabilité, ils permettent une description lithologique précise et une caractérisation géomécanique des différentes couches traversées.
- **Essais SPT (Standard Pénétration Test, avec un forage préalable) :** utilisés pour déterminer la résistance des sols, estimer leur compacité ou consistance, évaluer leur portance, ainsi que pour aider à définir le type de fondation adapté aux ouvrages à construire.

- **Essais en laboratoire :** pour analyser les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des échantillons prélevés (granulométrie, limites d'Atterberg, densité, Proctor, CBR, etc.).

L'objectif principal de cette campagne est d'évaluer les caractéristiques géotechniques du sol en vue de :

- Dimensionner la plate-forme conformément aux exigences de la norme UIC 719.
- Déterminer les types de fondations adaptés pour les ouvrages d'art et les bâtiments.
- Évaluer des risques géotechniques, notamment la stabilité des talus en remblai et en déblai, à travers le calcul du facteur de sécurité.

VII.3.1.1 Plate-forme :

VII.3.1.1.1 Section déblais :

Conformément à la ligne rouge du profil en long, des puits de reconnaissance de 4 à 5 mètres de profondeur seront réalisés à la pelle mécanique au niveau des zones en déblais. Des échantillons remaniés y seront prélevés pour des essais d'identification (granulométrie, limites d'Atterberg) et des essais mécaniques en laboratoire, dans le but d'évaluer la possibilité de réutiliser ces matériaux en remblais.

En complément, des échantillons intacts, protégés par paraffine, seront prélevés pour déterminer les caractéristiques géotechniques in situ telles que la teneur en eau naturelle, la densité, la cohésion et l'angle de frottement interne. Enfin, des essais au pénétromètre dynamique lourd et des essais de pénétration standard (SPT) viendront compléter ces investigations, permettant d'établir un profil continu de la résistance mécanique des sols en place et de mieux caractériser l'hétérogénéité des formations traversées.

Tableau VII-1 :Programme géotechnique des sections en déblai.

<table>
<tr><th colspan="6">Déblais</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Localisation Pk</th><th rowspan="2">Hauteur moy du déblai</th><th rowspan="2">Longueur de déblai</th><th colspan="3">Essai géotechnique</th></tr>
<tr><th>Essai in situ</th><th>Prof (m)</th><th>Essai au laboratoire</th></tr>
<tr><td rowspan="2">626+800</td><td rowspan="2">2.041</td><td rowspan="2">425 m</td><td rowspan="6">-Puit de reconnaissance.
- Pénétromètre dynamique lourd.
- Essais pénétration standard SPT</td><td>4</td><td rowspan="6">- Essais d'identification physique (G, γ, W, Ip..).
- Proctor modifié.
- CBR
- Essais de la résistance à la compression simple.
- Analyses chimiques</td></tr>
<tr><td>Au Refus</td></tr>
<tr><td rowspan="2">629+075</td><td rowspan="2">4.96</td><td rowspan="2">775 m</td><td>4</td></tr>
<tr><td>Au Refus</td></tr>
<tr><td rowspan="2">636+350</td><td rowspan="2">2.14</td><td rowspan="2">125 m</td><td>4</td></tr>
<tr><td>Au Refus</td></tr>
</table>

NB : Dans le cas le plus défavorable pour déblais, un sondage carotté de 10 m doit être réalisée pour évaluer la stabilité des pentes au plus tard.

VII.3.1.1.2 Section Remblais :

Les contraintes géométriques du tracé nécessitent la mise en place de remblais de hauteurs variables sur certaines sections. Pour cela, plusieurs puits de reconnaissance d'une profondeur comprise entre 3 à 4 mètres seront réalisés par section, en fonction de la longueur et de l'hétérogénéité des sols.

Des essais in situ, notamment au pénétromètre dynamique lourd et par essais de pénétration standard (SPT), seront réalisés pour évaluer la résistance du terrain. Parallèlement, des prélèvements d'échantillons intacts paraffinés permettront de déterminer les paramètres géotechniques essentiels, tels que la teneur en eau, la densité, la cohésion, l'angle de frottement interne et la compressibilité des matériaux.

Tableau VII-2 : Programme géotechnique des sections en remblai.

<table>
<tr><th colspan="5">Remblais</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Localisation Pk</th><th rowspan="2">Hauteur moy du remblai</th><th colspan="3">Essai géotechnique</th></tr>
<tr><th>Essai in situ</th><th>Prof (m)</th><th>Essai au laboratoire</th></tr>
<tr><td rowspan="2">620+800
622+375</td><td rowspan="2">4.17</td><td rowspan="10">- Puit de reconnaissance.
- Pénétromètre dynamique lourd.
- Essais pénétration standard.</td><td>4</td><td rowspan="10">- Essais d'identification physique (G, γ, W, Ip..).
- Essai cisaillement rectiligne.
- Essai Oedométrique</td></tr>
<tr><td>Au refus</td></tr>
<tr><td rowspan="2">623+500
626+400</td><td rowspan="2">5.76</td><td>4</td></tr>
<tr><td>Au refus</td></tr>
<tr><td rowspan="2">627+050
628+500</td><td rowspan="2">7.02</td><td>4</td></tr>
<tr><td>Au refus</td></tr>
<tr><td rowspan="2">629+350
632+100</td><td rowspan="2">6.01</td><td>4</td></tr>
<tr><td>Au refus</td></tr>
<tr><td rowspan="2">636+575
638+375</td><td rowspan="2">4.93</td><td>4</td></tr>
<tr><td>Au refus</td></tr>
</table>

NB : Dans le cas le plus défavorable pour remblais, un sondage carotté de 10 m doit être réalisée pour évaluer la stabilité des pentes au plus tard.

VII.3.1.2 Lot ouvrage d'art et bâtiment :

Pour chaque ouvrage d'art, un sondage carotté sera réalisé, complété par des essais pressiométriques et pénétrométriques. Les données des remblais seront également exploitées.

Des échantillons intacts paraffinés seront prélevés pour déterminer les paramètres intrinsèques et les caractéristiques de comportement des matériaux en place (teneur en eau, densité, cohésion, angle de frottement, etc.). Parallèlement, les essais au pénétromètre dynamique lourd fourniront une estimation continue de la résistance mécanique du sol sur l'ensemble du profil étudié, permettant ainsi d'identifier d'éventuelles zones d'hétérogénéité ou de faiblesse.

Tableau VII-3: Programme géotechnique pour les ouvrages d'art et bâtiment.

Lot ouvrage d'art et bâtiment				
Ouvrage	**Localisation**	**Essai géotechnique**		
		Essais in situ	**Prof (m)**	**Essais au laboratoire**
Passage supérieur (Rétablissement Routier)	**622+735**	Sondage carotté. Essai pressiométrique. Essais pénétromètre dynamique jusqu'au refus.	**10**	Essais d'identification physique (G, γ, W, Ip..). - Essai cisaillement rectiligne. - Essai Oedométrique
BV gare Oum El Assel	**640+600**		**10**	

NB : Le programme d'investigation géotechnique réalisé est suffisant pour caractériser les sols le long du tracé.

Cependant, dans le programme d'investigation d'autres essais sont programmés, mais les résultats ne sont pas encore disponibles au moment de la rédaction.

En l'absence de données à certains points kilométriques (PK), nous avons utilisé les résultats de l'APD du projet ainsi que ceux du programme géotechnique de SAETIL, en gardant les mêmes PK de référence.

Le tracé actuel étant légèrement décalé par rapport à celui de l'APD, un réajustement des emplacements des essais in situ a été nécessaire, notamment pour les zones de remblais et déblais.

VII.4 Essais in situ :

VII.4.1 Méthodologie d'investigation :

A. Sondages carottés :

Les sondages carottés ont été réalisés à l'aide d'un carottier rotatif équipé d'un trépan et de tubes à carottes. Le matériel utilisé comprend une foreuse hydraulique montée sur chenilles, un carottier double et un système de récupération de carottes. Ces sondages permettent :

- Le prélèvement d'échantillons intacts sur toute la profondeur explorée.
- L'identification précise de la stratigraphie : c'est-à-dire la succession et l'épaisseur des différentes couches géologiques traversées, essentielle pour comprendre la composition et la structure du terrain.
- La collecte d'échantillons représentatifs : utilisables pour des essais en laboratoire visant à déterminer les propriétés mécaniques et physiques du sol, notamment les essais œdométriques (compressibilité et consolidation), triaxiaux (résistance au cisaillement sous contraintes contrôlées) et de cisaillement direct (résistance au glissement).

B. Puits de reconnaissance :

Les puits ont été réalisés à l'aide d'une pelle mécanique type rétro-chargeur ou à la main selon l'accessibilité. Ils sont généralement carrés (1 m × 1 m) et atteignent des profondeurs de 3 à 4 mètres.
Ils permettent :

- Une observation directe des horizons géologiques.
- Le prélèvement d'échantillons en masse pour essais Proctor, CBR ou analyse granulométrique.
- L'identification de structures du sol (stratification, fissures, traces d'humidité, matériaux anthropiques).

C. Pénétromètre dynamique Lourd PDL : (N FP 94-115)

Les essais pénétrométriques ont été réalisés à l'aide d'un pénétromètre dynamique lourd de type BORRO, conformément à la norme NF P 94-115.Ce type d'essai permet d'évaluer la compacité, la consistance et la portance des couches de sol en place, ainsi que de détecter toute variation brutale de résistance avec la profondeur. Le pénétromètre dynamique lourd comprend :

- Un mouton de 63,5 kg (masse M), tombant librement d'une hauteur de 76 cm (H).
- Une tige filetée reliée à un cône normalisé de surface A= 10 cm²
- Un système de guidage vertical monté sur trépied ou portique.
- Un compteur de coups et un dispositif de lecture du refus moyen (e).

À chaque coup, le cône s'enfonce dans le sol. Le nombre de coups nécessaires pour une pénétration de 10 cm, noté N_{10}, est enregistré. Ce nombre sert à calculer la résistance dynamique de pointe Rd, qui reflète la résistance du sol. En représentant Rden fonction de la profondeur, on obtient des pénétrogrammes (donnés en annexe), utiles pour identifier les couches porteuses, les zones moins denses ou les matériaux hétérogènes. La résistance dynamique de pointe Rd est calculée à partir du nombre de coups selon la formule des Hollandais :

$$R_d = \frac{M^2 H}{A\, e\, (M + P)}$$

Avec :

- M = masse du mouton (M)
- H = hauteur de chute du mouton.
- e = refus (pénétration moyenne par coup).
- A = section de la pointe du pénétromètre dynamique.
- P = poids des tiges.

Ensuite, la capacité portante Q est liée à la résistance de pointe par la relation :

$$Q = {}^{\mathbf{Rd}}/_{\mathbf{FS}}$$

où FS est un coefficient empirique dépendant du type de sol et du facteur de sécurité choisi.

D. Essai de pénétration standard « SPT » :

L'essai de pénétration standard est une méthode géotechnique utilisée pour caractériser le sol et obtenir un échantillon remanié. Il mesure la résistance d'un carottier normalisé enfoncé dans un forage, applicable aux sols fins et granulaires (éléments < 20 mm), jusqu'à 50 m de profondeur.

À une profondeur donnée H, le carottier est enfoncé sur 45 cm par battage.

Trois mesures sont effectuées, chacune sur 15 cm :

- N1 : de H à H+15 cm.

- N2 : de H+15cm à H+30 cm.
- N3 : de H+30cm à H+45 cm.

Le nombre de coups SPT est calculé par : N =N2+N3

Ce nombre sert à évaluer la résistance et la compacité du sol.

VII.5 Essais de laboratoire

Notre campagne d'investigation géotechnique a comporté une série complète d'essais de laboratoire, réalisés sur deux types d'échantillons afin de caractériser précisément les matériaux du site.

- **Échantillons intacts :** Prélevés lors des sondages carottés, ces échantillons non remaniés ont permis d'analyser les propriétés du terrain naturel, notamment les caractéristiques mécaniques et de déformabilité.
- **Échantillons remaniés :** Issus des puits de reconnaissance, ces échantillons ont été soumis à des essais d'identification et de caractérisation mécanique pour évaluer leur potentiel de réutilisation en remblai.

Le tableau suivant détaille l'ensemble des essais réalisés selon les normes en vigueur :

Tableau VII-4 : Essais de laboratoire réalisés, normes applicables et paramètres déterminés.

Type d'échantillon	Essai	Norme	Paramètres déterminés
Échantillons intact (Sondages carottés)	Analyse granulométrique	NF P 94-056/057	Distribution dimensionnelle des particules
	Limites d'Atterberg	NF P 94-051	WL (%), WP (%), IP (%)
	Paramètres physiques	NF P 94-050	δd, δw, Wn (%), Sr (%)
	Cisaillement CD	NF P 94-071-1	C (Bar), φ (°)
Échantillons remaniés (Puits de reconnaissance)	Essai œdométrique	XP P 94-090-1	σ'p (kPa), Cc, Cg, Cv (m²/s)
	Compression simple (roche)	NF XP P94-202	Rc (MPa), E (GPa)
	Analyses chimiques	NF P 18-011	Teneur en sulfates, chlorures, pH
	Analyse granulométrique	NF P 94-056/057	D10, D30, D60, Cu, Cc
	Limites d'Atterberg	NF P 94-051	WL (%), WP (%), IP (%)
	Paramètres physiques	NF P 94-050	γd, γw, Wn (%), Sr (%)
	Valeur au bleu	NF P94-068	VBS (g/100g)

	Proctor Modifié	NF P 94-093	γdOPM (kN/m³), WOPM (%)
	CBR immédiat/après immersion	NF P 94-078	IPI, CBR4j

VII.6 Présentation des résultats :

Les résultats des essais de laboratoire effectués sur les échantillons prélevés ont permis de classifier les sols conformément aux normes de classification GTR et UIC. Ces données sont essentielles pour la conception des ouvrages prévus:

VII.6.1 Sondages carottés :

Les sondages carottés ont été réalisés afin d'identifier avec précision la nature lithologique des couches de sol et de prélever des échantillons intacts pour les analyses en laboratoire. Les carottes extraites ont fait l'objet d'analyses détaillées permettant de déterminer les propriétés physiques et mécaniques des matériaux, notamment leur densité, leurs limites d'Atterberg, leur composition granulométrique et leur résistance à la compression simple.

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus sur les échantillons prélevés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VII-5 : Résultats des sondages carottés effectués sur le tronçon d'étude.

N° forages	Profondeur (m)	Densité (t/m3)	Limites d'Atterberg			granolu	RCS	classification	
		δd (t/m3)	Wl	Wp	IP	< 80 µm	MPa	UIC	GTR
F59 622+735 (Passage supérieur)	0-5	2.10	25.15	21.98	3.23	11	-	QS2	B4
	5.00 – 5.40	1.9	26	20.6	5.40	17.15	25.4	QS2	R3
F 63 (640+600 BV GARE)	4.00– 5.00	2.05	15,23	8,19	7,00	8	29.9	QS2	R3
	9.00-9.20	1.92	NR	NR	NR	8.36	26.4		R3

NR : Non Réalisé.

Le tableau ci-dessous présente la répartition détaillée des forages réalisée en APD et leurs principales caractéristiques lithologiques.

Tableau VII-6 : Lithologie de la zone d'étude.

N° Forage	Profondeur (m)	Lithologie
F59 622+735	0.00- 5.00	Alternance de calcaire et sable rougeâtre.
	5.00-10.00	Calcaire dur blanchâtre.
F60 627+100	0.00- 5.00	Alternance de calcaire et sable rougeâtre.
	5.00-10.00	Calcaire dur blanchâtre.
F61 629+000	0.00-7.00	Alternance de calcaire et sable rougeâtre.
	7.00-10.00	Calcaire dur blanchâtre.
F62 636+900	0.00-7.00	Alternance de calcaire et sable rougeâtre.
	7.00-10.00	Calcaire altéré blanchâtre.
F63 640+600	0.00-10.00	Alternance de calcaire et sable rougeâtre.

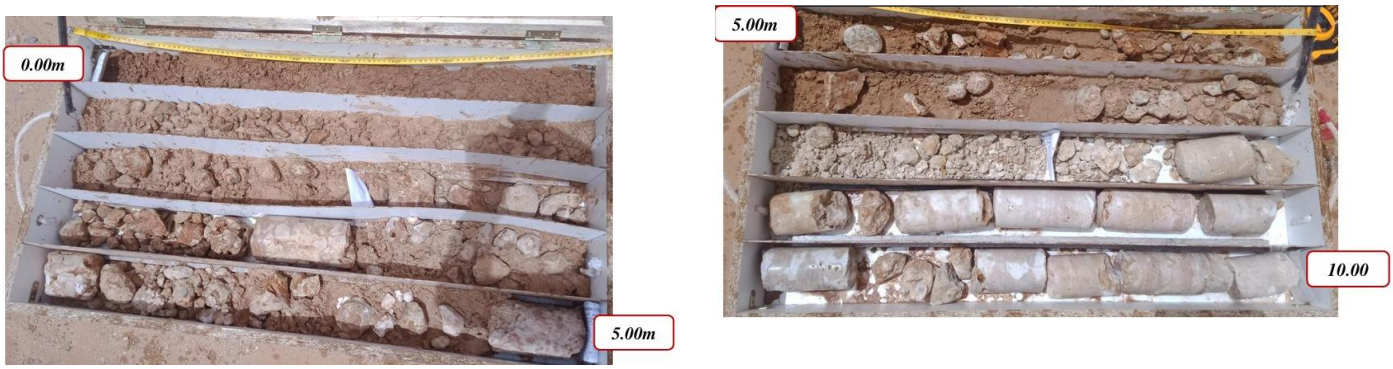


Figure VII-6 : Sondage carroté F59 622+775 .

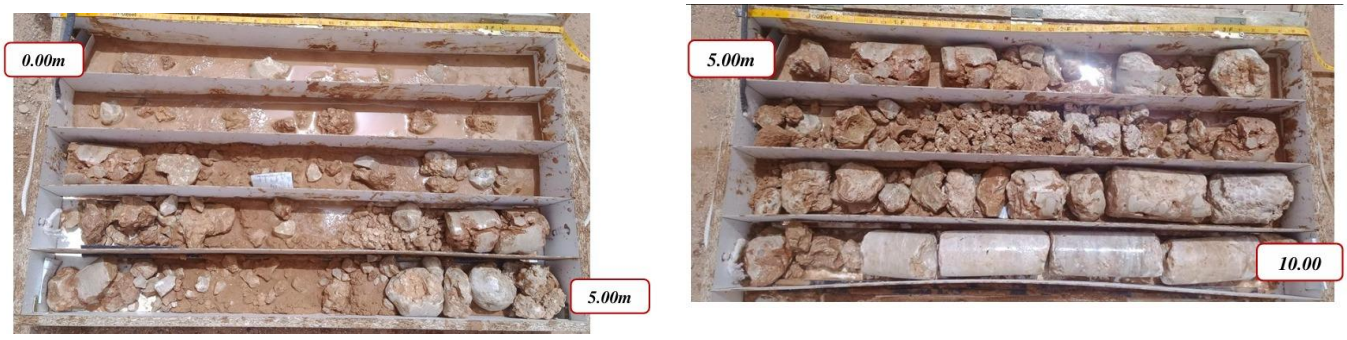


Figure VII-7: Sondage carotté F63 639+500.

✓ **Interprétation du tableau sondages carottés :**

Les essais réalisés révèlent un un sol constitué de gravier, sable grossier et sable fin et parfois de cailloux, sable grossier et sable fin, de qualité satisfaisante, classée QS2 selon l'UIC 719R**,** avec une plasticité faible à nulle (IP ≤ 5,4) et une résistance à la compression

simple supérieure à 25 MPa pour la roche du calcaire, conforme aux exigences des plateformes ferroviaires.

Leur portance et leur stabilité permettent la réalisation de fondations superficielles ou semi-profondes sans amélioration du sol, sauf dans certaines zones altérées, où un traitement local du sol peut être nécessaire.

VII.6.2 Puits de reconnaissance :

Ces puits ont permis d'effectuer une série d'essais complémentaires, notamment des analyses granulométriques, des essais de plasticité, des essais Proctor, des essais CBR et des mesures de la valeur au bleu de méthylène.

Le tableau suivant synthétise l'ensemble des résultats obtenus pour les unités calcaires et sableuses identifiées.

Tableau VII-7 : Synthèse des résultats géotechniques sur les puits de reconnaissances.

Puits	granlo	Limites d'Atterberg (%)			Essai Proctor		CBR	VBS	Classification	CBR
	< 80 µm	Wl	Wp	IP	Wopm (%)	δd (t/m3)			UIC	GTR
PU-290	4.00	NR	NR	NR	NR	NR	NR	0.33	-	B4
PU-291	2.94	NR	NR	NR	NR	NR	NR	0.34	-	B4
PU-292	7,90	25.70	22.08	3.62	9.29	2.13	80.69	0.66	QS2	B4
PU-293	7.86	NR	NR	NR	8.87	2.10	81.27	0.66	QS2	B4
PU-294	6,65	NR	NR	NR	10.47	2.12	80.47	0.34	QS2	B4
PU-295	8.00	NR	NR	NR	10.24	2.11	78.39	0.33	QS2	B4
PU-296	23.00	29	18.60	10.40	12.00	1.95	24.00	0.48	QS1	B5
PU-297	11.00	30.80	21.28	9.52	9.78	2.12	85.86	0.33	QS2	B4
PU-298	14.00	30.52	20.69	8.87	10.45	2.10	67.78	0.33	QS1	B5
PU-299	8.00	15.05	7.77	7.00	7.63	1.95	51.30	1.06	QS2	B4
PU-300	6.00	14.86	7.80	7.00	6.40	1.62	48.00	0.40	QS2	B4
PU-301	8.00	15.23	8.19	7.00	6.92	2.05	43.50	0.33	QS2	B4
PU-302	16.00	17.22	8.75	8.00	10.47	2.15	58.10	1.03	QS1	B5
PU-303	25,00	19,02	9,20	10,00	12,64	2,13	53,40	1,00	QS2	B5
PU-304	12,00	16,93	8,82	8,00	9,87	2,10	60,60	0,46	QS2	B4
PU-305	19,00	18,18	9,13	9,00	11,65	2,13	51,30	0,53	QS1	B5

✓ **Interprétation du tableau PU :**

Les puits de reconnaissance révèlent une structure de sol homogène, bien compacte, avec une granulométrie équilibrée et une faible sensibilité à l'eau. Les matériaux en place présentent un

bon comportement mécanique et une stabilité satisfaisante en conditions naturelles, ce qui garantit une bonne tenue des plateformes.

VII.6.3 SPT :

Les essais de pénétration standard (SPT) ont été réalisés dans les forages à différentes profondeurs pour évaluer la compacité des sols in situ. Les résultats obtenus, présentés dans le tableau ci-dessous, indiquent une très forte compacité des terrains, avec de nombreux refus attestant de la présence de matériaux très résistants à faible profondeur.

Tableau VII-8 : Pénétration standard (SPT).

N° sondages	Profondeur (m)	N1	N2	N3	N	Classification
F 59	3.00-3.45	40	Refus	Refus	Refus	Très compact
	6.00-6.45	Refus	Refus	Refus	Refus	Très compact
	9.00-9.45	Refus	Refus	Refus	Refus	Très compact
F 60	3.00-3.45	41	55	Refus	Refus	Très compact
	6.00-6.45	Refus	Refus	Refus	Refus	Très compact
	9.00-9.45	Refus	Refus	Refus	Refus	Très compact
F 61	3.00-3.45	40	50	Refus	Refus	Très compact
	6.00-6.45	55	Refus	Refus	Refus	Très compact
	9.00-9.45	Refus	Refus	Refus	Refus	Très compact
F 62	3.00-3.45	38	49	Refus	Refus	Très compact
	6.00-6.45	50	Refus	Refus	Refus	Très compact
	9.00-9.45	Refus	Refus	Refus	Refus	Très compact
F 63	3.00-3.45	39	50	Refus	Refus	Très compact
	6.00-6.45	50	Refus	Refus	Refus	Très compact
	9.00-9.45	Refus	Refus	Refus	Refus	Très compact

✓ **Interprétation du tableau essais SPT :**

Les refus systématiques dès 3,45 m révèlent un substratum extrêmement compact et homogène sur l'ensemble du site. Cette compacité exceptionnelle se traduit par une portance élevée (> 600 kPa), garantissant une excellente assise pour des fondations superficielles, tout en pouvant nécessiter des moyens d'excavation renforcés.

VII.6.4 Pénétromètre dynamique lourd :

Afin de compléter la caractérisation géomécanique des sols le long du tracé, des essais au pénétromètre dynamique lourd (PDL) ont été réalisés à intervalles réguliers. Ces essais permettent d'obtenir un profil continu de la résistance dynamique des sols et d'identifier

d'éventuelles anomalies ou hétérogénéités. Le tableau ci-après présente les résultats de ces essais, qui montrent généralement des refus à faible profondeur, confirmant la présence de matériaux compacts ou de blocs rocheux dans les premiers mètres du sous-sol.

Tableau VII-9 : Résultats pénétromètre dynamique lourd.

PK	N PDL	Observation
619+000	287	Refus à 1.8m
620+500	288	Refus à 1.8m
622+000	289	Refus à 1.4m
623+500	290	Refus à 3.6m
625+000	291	Refus à 0.6m
626+500	292	Refus à 1.0m
628+000	293	Refus à 1.4m
629+500	294	Refus à 0.6m
631+000	295	Refus à 0.4m
632+500	296	Refus à 1.0m
634+000	297	Problème d'accès
635+500	298	Refus à 0.8m
637+000	299	Refus à 0.8m
638+500	300	Refus à 1.6m
640+000	301	Refus à 1.8m
641+500	302	Refus à 2.4m

✓ **Interprétation du tableau Pénétromètre dynamique lourd :**

Les essais PDL confirment la présence de matériaux très résistants à faible profondeur avec refus majoritairement entre 0,4m et 1,8m. Cette distribution spatiale régulière des refus précoces (PK 619+000 à 641+500) souligne l'homogénéité latérale du substratum compact, favorable pour les fondations mais contraignant pour les terrassements, nécessitant probablement des techniques adaptées aux terrains rocheux.

VII.7 Zone d'emprunt :

Dans le cadre du projet ferroviaire s'étendant du PK 618+000 au PK 642+100, le Gîte 38, référencé PU38 et localisé au PK 603+000, a été identifié comme une source potentielle de matériaux. Ce gîte renferme du grès calcaire de qualité QS3, caractérisé par un coefficient d'uniformité de 4,0, indiquant une granulométrie adaptée à une large gamme d'usages.

Ce matériau présente une polyvalence technique notable, permettant son intégration dans plusieurs couches de l'infrastructure ferroviaire, notamment :

- le sous-ballast.

- la couche de forme.
- la couche de fondation.
- ainsi que la couche supérieure du remblai.

Bien que ce gîte soit situé en dehors des limites de notre tracé d'étude, il demeure la source la plus proche et techniquement exploitable dans l'environnement immédiat du projet. À ce titre, et en l'absence de gîtes de substitution inclus dans l'emprise du linéaire étudié, le recours au Gîte 38 est justifié et stratégique pour l'approvisionnement en matériaux conformes aux exigences de qualité requises pour les travaux d'infrastructure.

VII.8 Synthèse des résultats :

Suite aux ses investigations, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Propriétés	Valeurs	Commentaire
Indice de Plasticité	3.62 - 10.40	Matériau faiblement à moyennement plastique, indiquant une faible teneur en argiles. Cela traduit une faible sensibilité aux variations d'humidité, ce qui est favorable aux travaux de terrassement.
CBR	24.00 - 85.86	Bonne à très bonne portance. Les valeurs supérieures à 30 % sont particulièrement adaptées aux couches de forme ou de fondation, assurant une capacité portante élevée.
Densité optimale	16,2 - 21,5	Densité optimale élevée, traduisant un potentiel de compacité satisfaisant après mise en œuvre. Cela garantit une bonne stabilité de la plateforme après compactage.
Teneur en eau optimale	6.40 -12.64	Plage étroite indiquant une sensibilité à la teneur en eau lors de la mise en œuvre. Un contrôle précis de l'humidité sera nécessaire pendant les travaux de compactage.
Valeurs au bleu de méthylène	0.33 - 1.06	Faible activité argileuse. Le matériau présente une très faible sensibilité à l'eau, ce qui confirme sa bonne stabilité en conditions humides. Il peut être utilisé en zones sujettes aux remontées capillaires ou à l'humidité.
résistance à la compression simple	25.4 - 29.9	Résistance mécanique satisfaisante, appropriée pour supporter les charges prévues. Indique un matériau suffisamment résistant pour les couches structurelles.

D'après les résultats des essais en laboratoire, la plupart des sols analysés sont classés en catégorie B4 selon la classification GTR, ce qui correspond à des graves sableuses peu argileuses.

Selon les critères de la norme UIC 719R, ces sols sont identifiés comme QS2, une classe correspondant à une qualité moyenne. Ces matériaux sont généralement acceptables pour la construction de plateformes, à condition que des mesures spécifiques soient prises, notamment un drainage efficace pour éviter la saturation en eau, ainsi qu'un renforcement ou un traitement approprié pour améliorer leur stabilité mécanique.

VII.9 Conclusion :

L'étude géotechnique réalisée sur le site a révélé des conditions de sol favorables pour l'implantation de l'infrastructure ferroviaire. Les multiples essais in situ et analyses en laboratoire ont démontré une bonne homogénéité des terrains et des propriétés mécaniques adaptées aux charges prévues. Les résultats obtenus permettent d'optimiser la conception des fondations et de garantir la stabilité à long terme de l'ouvrage, tout en identifiant les quelques zones nécessitant une attention particulière lors de la construction. Ces données techniques constitueront un support essentiel pour les phases ultérieures du projet.

CHAPITRE VIII
ASSISE FERROVIAIRE

CHAPITRE VIII. ASSISE FERROVIAIRE :

VIII.1 Introduction :

L'assise ferroviaire joue un rôle essentiel dans la stabilité et la durabilité d'une voie ferrée. Elle permet de répartir les charges transmises par le passage des trains et de les transférer progressivement au sol naturel. Pour qu'elle remplisse pleinement sa fonction, son dimensionnement doit être rigoureux et adapté aux caractéristiques du terrain, du trafic et des matériaux utilisés. Ce chapitre aborde les bases du dimensionnement de l'assise ferroviaire, en s'appuyant sur les principes techniques et les exigences pratiques rencontrées dans les projets ferroviaires.

VIII.2 Structure d'assise ferroviaire :

La structure d'assise constitue la base de l'infrastructure ferroviaire sur laquelle repose la voie. Elle joue un rôle essentiel dans la répartition des efforts mécaniques et dans la stabilité de l'ensemble de la voie ferrée.

Fonctions principales de la structure d'assise :

- Répartir les charges transmises par les traverses sur l'ensemble de la plate-forme.
- Amortir les vibrations induites par le passage des trains.
- Assurer la stabilité longitudinale et latérale de la voie.
- Maintenir la rigidité de la voie, son nivellement ainsi qu'un bon drainage des eaux.

- **Composition des couches d'assise :**
  - **Le ballast**, situé en surface, assure la transmission des charges, le drainage et la tenue géométrique de la voie.
  - **Le sous-ballast**, placé sous le ballast, protège les couches inférieures et améliore la répartition des charges.
  - **La couche de fondation**, qui soutient les couches supérieures, contribue à la stabilité globale.
  - **La couche anti-contaminante**, lorsqu'elle est mise en œuvre, empêche les remontées de fines provenant du sol naturel vers les couches supérieures.

Ces couches interagissent de manière solidaire pour absorber les sollicitations mécaniques dues au trafic ferroviaire.

- **Les caractéristiques et épaisseurs de ces couches sont définies en fonction de plusieurs paramètres** :
  - Le type de circulation prévue : nature des trains, charge par essieu, trafic annuel, et vitesse maximale.
  - Les composants de la voie : type de rail, nature et granulométrie du ballast, type de traverses et de fixations.
  - Les propriétés géotechniques de la plate-forme : portance, perméabilité, état hydrique, et conditions hydrologiques locales.
  - Les conditions climatiques du site.

Ces éléments permettent d'adapter la conception de l'assise pour garantir la performance, la durabilité et la sécurité de la voie.

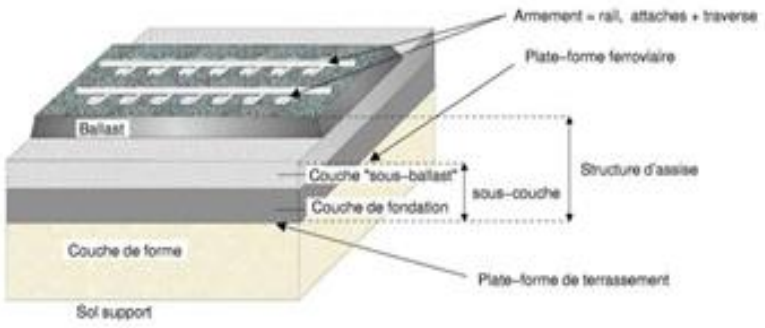


Figure VIII-1 : Structure des couches de l'assise ferroviaire.[34]

VIII.3 Stratification de l'assise ferroviaire :

D'après la fiche UIC 719, la construction de la structure d'assise est constituée comme suit :

VIII.3.1 Couche de ballast :

Selon la fiche UIC 719, le ballast est considéré comme partie intégrante de la superstructure de la voie. Cette couche est composée de granulats d'une granulométrie grossière de 31,5/50 mm, avec une épaisseur de 25 à 30 mm. Elle est positionnée dans la partie supérieure des structures d'assise et entre les traverses, et provient du concassage de roches dures.

Le ballast doit présenter des qualités de haute résistance à l'usure et respecter les caractéristiques mécaniques suivantes :

- Valeur de propreté VBS ≤1.
- Résistance à la fragmentation (essai Los Angeles) : LA ≤ 25.
- Valeur combinée : LA + MDE ≤ 40.

Le ballast utilisé doit être conforme au document des spécifications techniques (ST590B).

VIII.3.2 Sous-couche :

La sous-couche constitue un élément essentiel de la structure d'assise, placée entre le ballast et la plate-forme. Elle est composée de matériaux granulaires bien calibrés (type grave 0/31,5) et peut se présenter en une ou plusieurs couches : une couche de sous-ballast, une couche de fondation, et, si nécessaire, une couche anti-contaminante.

Fonctions principales de la sous-couche :

- Renforcement de la portance : Elle améliore la capacité portante de l'infrastructure en répartissant efficacement les charges transmises par la voie.
- Réduction des vibrations : En absorbant une partie des ondes vibratoires générées par le passage des trains, elle contribue au confort et à la stabilité de la voie.
- Protection contre la contamination : Elle agit comme une barrière empêchant la migration des particules fines du sol vers le ballast, préservant ainsi sa fonction mécanique.

[34] https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQu-444_gawC9QajsPW5RHKw-YgNmotXXjI-GmQkHV9HjxTirfSWZGcZTGI&s=10

- Prévention de l'érosion et du gel : Elle limite les phénomènes de dégradation dus à l'eau et aux cycles de gel-dégel.
- Assainissement : Grâce à sa perméabilité, elle permet un drainage efficace des eaux de pluie, évitant l'accumulation d'humidité sous la voie.

- **Caractéristiques techniques recommandées :**
  - Valeur de propreté (VBS) : ≤ 1.
  - Coefficient de forme (A) : ≤ 25 %.
  - Résistance mécanique (LA + MDE) : ≤ 40.

➢ **Couche anti-contaminante :**

Lorsque le sol support (plate-forme) présente une faible qualité (type PF1), une couche filtrante est ajoutée. Elle est constituée de sable propre et peut être renforcée par un géotextile ou une géomembrane pour bloquer les remontées de fines et assurer une séparation durable entre les matériaux.

VIII.3.3 Plate-forme :

VIII.3.3.1 Définition de la plate-forme :

La plate-forme ferroviaire constitue le support fondamental de la voie ferrée. Elle est composée de plusieurs couches de matériaux et repose soit sur des terres compactées en remblai, soit directement sur le sol naturel en cas de déblai.

- **Fonctions principales de la plate-forme :**
  - Assurer l'évacuation des eaux de pluie et des eaux de ruissellement vers les dispositifs de drainage.
  - Atténuer les vibrations provoquées par le passage des trains.
  - Réduire la remontée des eaux souterraines vers la surface.
  - Empêcher la migration des particules fines (argiles, limons) du sol vers le ballast, ce qui préserverait sa stabilité.
- **Éléments à vérifier pour évaluer l'efficacité de la plate-forme :**
  - Tester la résistance mécanique de la plate-forme pour garantir sa stabilité sous les charges ferroviaires.
  - Étudier les caractéristiques géotechniques des sols sur lesquels elle repose.
  - S'assurer que la conception et la réalisation respectent les normes techniques en vigueur.
  - Veiller à ce que la couche supérieure du sol ne soit pas immergée dans la nappe phréatique. Avant tout rabattement éventuel, il est indispensable de mesurer avec précision le niveau de la nappe.

VIII.3.3.2 La classe de portance de la plateforme :

D'après les spécifications du code UIC 719 R, nous identifions les trois catégories de plateformes suivantes en fonction de leur capacité portante : P1 (médiocre qualité). P2 (moyenne qualité) et P3 (bonne qualité). Chaque catégorie de plateforme a sa propre capacité à supporter du poids : médiocre pour charges limitées, moyenne pour poids moyen, et haute qualité pour charges importantes grâce à des sols de meilleure qualité. En conséquent,

l'épaisseur de la couche de forme dépendra du type de la qualité de sol support et de la classe de portance envisagée pour la plateforme.

➢ Le tableau ci-dessous présente les classes de plateforme en fonction de la qualité du sol support :

Tableau VIII-1 : La classe la portance de la plate-forme.

Classe de qualité du sol	Classe de la Plate-forme	Couche de forme	
		Qualité	Épaisseur min (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	-

VIII.3.3.3 Plate-forme proposée :

Selon les spécifications du projet de la ligne ferroviaire Béchar-Tindouf -Gara Djebilet, la ligne peut offrir un trafic journalier important avec des vitesses voyageurs pouvant atteindre les 160 km/h et un trafic fret d'une vitesse de 70km/h. donc, nous recommandons l'utilisation d'une plateforme de type P3 (qualifiée de bonne plateforme).

VIII.3.3.4 Couche de forme :

Pour garantir une plate-forme de qualité PF3, il a été convenu de mettre en place une couche de forme de 35 cm d'épaisseur utilisant un matériau de qualité du sol QS3 dans les zones où le sol présente une qualité QS2 (d´après les caractéristiques géologiques et géotechniques).

➢ Ce choix a été fait pour garantir que la plateforme soit performante et stable.

VIII.4 Dimensionnement de la structure d'assise :

VIII.4.1 Calcul les épaisseurs minimales des couches de ballast et sous-ballast de pleine voie :

Le dimensionnement des épaisseurs des couches de ballast et sous-couche a été fait suivant la norme UIC 719 R, qui montre l'épaisseur de ballast et sous-ballast requise pour une ligne ferroviaire.

L'épaisseur est donnée par la formule suivante (UIC 719 R page 57) :

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

Avec :

➢ Pour le cas du projet Béchar-Tindouf - Ghar Djebilet :

Paramètres	Valeurs (m)	Critère de choix
E	0.45	Pour une plate-forme de classe de portance p3
a	0	Les groupes uic 1 et 2 (selon UIC 714)
b	0.05	Pour les traverses en béton de longueur l = 2,415 m
c	0	Un dimensionnement normal.
d	+ 0,15	(par déduction à la charge 325 KN)
f	0.05	Les lignes parcourues à V 160km/h et P3
g	0	Pas de géotextile lorsque la couche de forme est en sol QS3
e (m)	**0.45+0.05+0.15+0.05=0.70m**	

L'épaisseur des couches d'assise est alors fixée à 0,70 m.

La couche de ballast mesure 30 cm pour des vitesses comprise entre 120 km/h à 200 km/h. ce qui correspond à notre situation suivant (fiche UIC-719 R).

VIII.4.2 Structure d'assise retenue :

Une voie ferrée est un composé des éléments répondant chacun à des normes précises selon la vitesse et autres paramètres. Le choix des éléments et les matériaux de la voie est une partie importante, qui influé à la fois sur la sécurité et l'économie. Après l'étude géologique et géotechnique et les caractéristiques de la voie (traverses, charge d'essieu). Voici le Profil type des couches d'assise dans notre le projet :

Tableau VIII-2: Structure de la voie.

Couches	Épaisseur (cm)	Matériaux
Ballast	30	Pierre cassée 25 à 50 mm.
Sous-Ballast	20	Grave propre (0 /31.5 mm) bien graduée.
Couche de fondation	20	Grave sableuse entièrement concassée.
Couche de forme de type QS3	35	GNT.

VIII.5 Conclusion :

Le dimensionnement de l'assise ferroviaire ne se limite pas à une simple application de formules : il repose sur une bonne connaissance géotechnique du sol, des contraintes d'exploitation et des matériaux disponibles. Une assise bien conçue réduit les risques de déformation, diminue les coûts d'entretien et améliore la performance globale de la voie. À travers ce chapitre, on comprend que chaque couche de l'assise, bien dimensionnée et bien mise en œuvre, contribue directement à la fiabilité de l'infrastructure ferroviaire.

CHAPITRE IX
PROFIL EN TRAVERS

CHAPITRE IX. PROFIL EN TRAVERS :

IX.1 Introduction :

Le profil en travers constitue une représentation transversale de l'infrastructure ferroviaire, perpendiculairement à son axe longitudinal. Cet élément fondamental de conception illustre avec précision la configuration des différentes couches structurelles, les variations altimétriques du terrain naturel, ainsi que les caractéristiques dimensionnelles et géométriques de la voie projetée.

C'est un Élément essentiel dans la conception ferroviaire, il facilite le calcul des volumes de terrassement, identifie les zones à risque et contribue à l'optimisation technique et environnementale du projet.

IX.2 Les éléments du profil en travers :

Tous les éléments suivants doivent être représentés dans le profil en travers :

IX.2.1 Les éléments de superstructure :

La superstructure ferroviaire comprend les éléments suivants qui doivent être intégrés dans la représentation du profil en travers :

- Type des rails mis en œuvre et l'écartement normalisé de la voie.
- Le type de la traverse utilisé.
- Système de fixation rail-traverse.
- La distance entre les axes (cas de plusieurs voies), pour notre projet on a une seule voie.
- Valeurs maximales de dévers en alignement courbe.

IX.2.2 Les éléments de l'infrastructure :

L'infrastructure ferroviaire regroupe les composantes suivantes :

- Couche de ballast avec spécification des caractéristiques granulométriques et épaisseurs de chaque couche.
- Plate-forme ferroviaire supportant l'ensemble de la structure.
- Pente transversale des diverses couches constitutives.
- Déclivités latérales de la plate-forme.

IX.2.3 Les éléments du talus :

Les talus présentent des caractéristiques spécifiques en fonction de leur nature (déblai ou remblai) et des propriétés géotechniques des matériaux concernés.

IX.2.3.1 Les éléments d'assainissement :

Le système d'assainissement comprend :

- Le type et dimension des ouvrages d'assainissement et/ou des drains.
- Fossés longitudinaux.

IX.3 Profil en travers de notre projet d'étude :

Le profil en travers type de ce projet correspond à une voie unique (voie mixte) , avec une largeur de plateforme de 8 m, que ce soit en déblais ou en remblai.

La voie ferrée est constituée de rails UIC-60 espacés de 1435 mm, reposant sur des traverses Monoblocs EN BP M450, elles-mêmes installées sur un couche ballast de 0,30 m d'épaisseur, avec une pente latérale de 3H/2V. La pente latérale de la plateforme est de 4%.

La hauteur d'armement (différence de niveau entre la plateforme et FSR) est de 0.731m calculé comme suite :

- Hauteur du rail : 0,172m.
- Hauteur de la traverse : 0,220m.
- Semelle cannelée de 0.009m.
- Hauteur minimale de ballast : 0.30m.

  - Dans les zones de remblai et de déblais, les talus ont été définis avec une inclinaison de 2H/1V pour les talus en remblais et 1H/3V pour les talus en déblais.
  - Des fossés longitudinaux de dimensions h= 0.5 m ; b = 0.5 m avec une pente de 1H/1V ont été construits au pied des talus.

NB : Lors d'un raccordement en pleine courbe, les épaisseurs de toutes les couches, à l'exception du ballast, resteront fixes. Pour obtenir le dévers requis, l'épaisseur du ballast sera augmentée.

IX.4 Calcul des cubatures :

Les volumes de terrassement représentent les variations de volume des déblais et des remblais dans le projet, visant à créer une surface uniforme en alignement avec la trajectoire du projet. La quantification volumétrique de ces opérations s'appuie sur trois paramètres fondamentaux :

• Les profils en long.

• Les profils en travers.

• Les distances entre les profils.

  ➢ Dans notre projet, les volumes de terrassement ont été calculés à l'aide du logiciel CIVIL 3D 2024.

Les résultats détaillés des calculs de cubatures sont synthétisés dans un tableau récapitulatif :

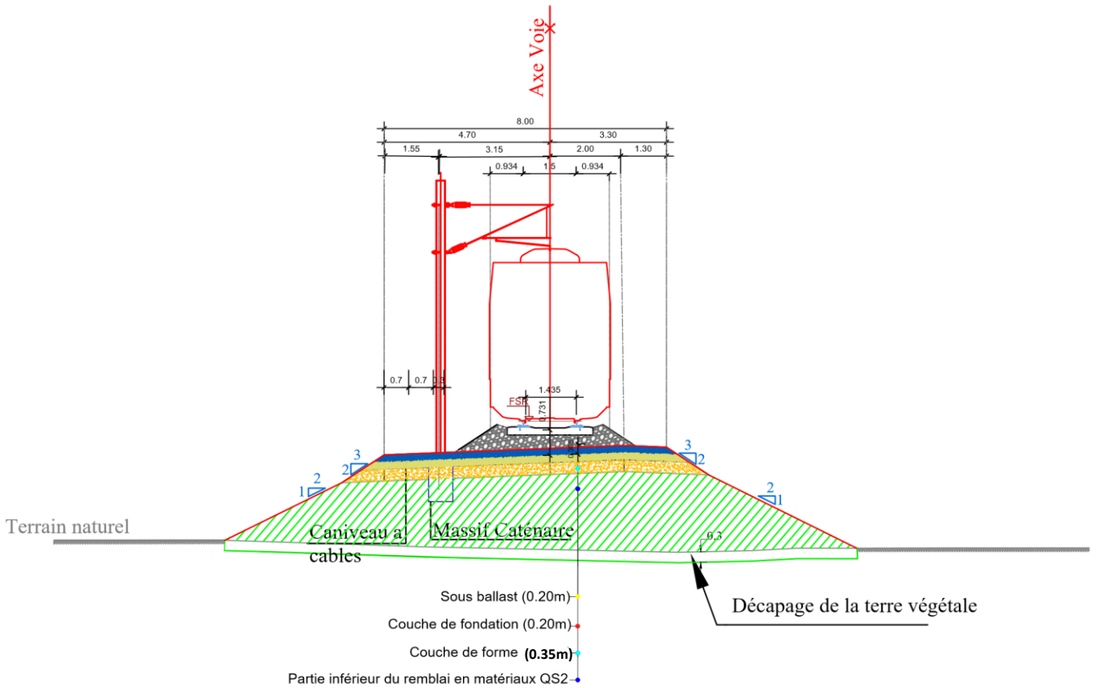
Tableau IX-1 : Les cubatures de terrassement et les couches d'assises.

Couche	Remblai	Déblais	Ballast	Sous ballast	Couche de fondation	Couche de forme	Décapage
Volume (m3)	777 925	162 536	50 069	34 816	37 496	72 064	136 985.76

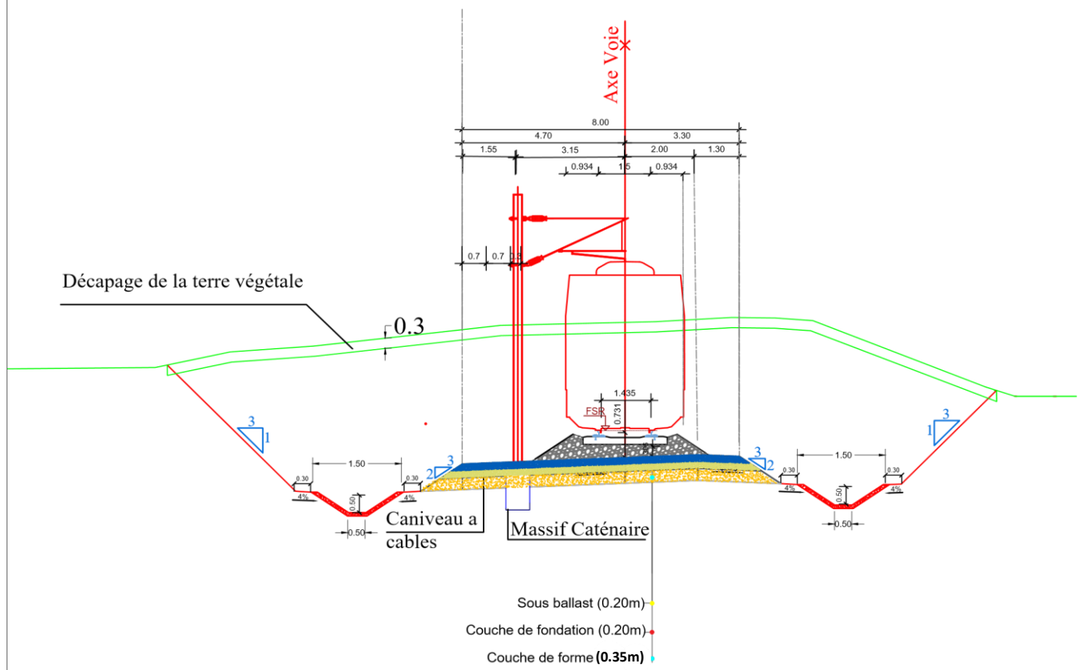
IX.5 Conclusion :

Les profils en travers représentent un élément déterminant dans l'élaboration et la réalisation des projets d'infrastructure ferroviaire. Leur conception rigoureuse permet d'atteindre un équilibre optimal entre les impératifs techniques de sécurité, les considérations économiques liées à l'optimisation des coûts, et les exigences environnementales inhérentes aux principes du développement durable.

PROFIL EN TRAVERS TYPE
PLATEFORME A VOIE UNIQUE Remblai ≤ 8m



PROFIL EN TRAVERS TYPE
PLATEFORME A VOIE UNIQUE -Déblai- ≤ 6m



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

PROJET DE FIN D'ETUDES	Réalisé par	Encadré par	Echelle	N° Planche	Année universitaire
Etude en APD de la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique Béchar-Tindouf-Gara Djebilet du PK618+000 AU PK639+000 avec l'aménagement et la conception de la gare de OUM EL ASSEL	BRAIK Raounek BOUCHIREB Khawla	Mr.BENINAL Abdelaziz	1/100	PROFIL EN TRAVERS TYPE	2024 / 2025

CHAPITRE X

TERRASSEMENT ET OUVRAGE D'ART

CHAPITRE X. TERRASSEMENT ET OUVRAGE D'ART :

X.1 Introduction :

Les travaux de terrassement constituent une étape fondamentale dans la réalisation d'un projet ferroviaire. Ils regroupent l'ensemble des opérations de déblai, de remblai, de compactage et de nivellement visant à adapter le terrain naturel au profil du tracé, tout en garantissant une assise stable et durable pour la plateforme ferroviaire. En parallèle, les ouvrages d'art – tels que les ponts, viaducs, passages inférieurs ou inférieur et tunnels – permettent de franchir les obstacles naturels ou artificiels tout en assurant la continuité du tracé.

X.2 Les terrassements :

Les terrassements occupent une place centrale dans la construction des infrastructures ferroviaires. Ils regroupent un ensemble d'opérations destinées à modeler le terrain naturel afin de créer une plateforme stable, régulière et conforme aux exigences géométriques du tracé. Ces travaux incluent notamment l'élimination de la terre végétale pour atteindre un sol apte à supporter les charges, l'exécution de déblais et de remblais pour ajuster le niveau du terrain, ainsi que la mise en place successive des différentes couches de structure, telles que la sous-couche et le ballast. La rigueur d'exécution est déterminante pour garantir la performance, la durabilité et la sécurité de la future voie ferrée. Ces interventions reposent sur des études géotechniques approfondies, indispensables pour adapter les méthodes de terrassement aux caractéristiques du sol et prévenir les risques associés.

X.2.1 Objectifs et enjeux des terrassements :

Les terrassements répondent à plusieurs objectifs techniques et environnementaux majeurs, qui conditionnent la qualité globale de l'infrastructure ferroviaire :

- Assurer la formation d'une plateforme stable, plane et homogène, indispensable à la pose et au bon comportement de la voie ferrée sous trafic.
- Employer des matériaux adaptés aux critères de portance, de compacité et de durabilité (granulométrie, plasticité, sensibilité à l'eau).
- Protéger les zones sensibles (milieux humides, habitats naturels, zones instables) à travers des mesures de traitement ou d'adaptation.
- Concevoir des talus et des remblais aux pentes maîtrisées pour garantir leur stabilité à court et long terme, notamment vis-à-vis des risques de glissement.
- Intégrer des dispositifs de drainage efficaces pour limiter l'érosion, maîtriser les eaux de ruissellement et éviter les accumulations néfastes.
- Réduire les nuisances vibratoires et sonores par un traitement approprié du substrat et de la structure de voie.
- Répondre aux exigences réglementaires en matière de protection de l'environnement et de respect des équilibres écologiques locaux.
- Contribuer à une gestion raisonnée des ressources naturelles, en particulier en préservant les sols fertiles et en optimisant l'usage de l'eau.

X.2.2 Décapage :

Phase initiale de préparation du terrain consistant à retirer les couches superficielles non porteuses, qu'il s'agisse de terre végétale riche en matières organiques ou de matériaux meubles et instables tels que les sables éoliens et dépôts désertiques. Cette opération a pour but d'atteindre un substrat stable et apte à supporter les charges de la structure ferroviaire. Les matériaux extraits, selon leur nature, peuvent être évacués ou valorisés dans des opérations spécifiques, comme la stabilisation des talus ou le contrôle de l'érosion. L'épaisseur de décapage varie généralement entre 0,20 m et 0,50 m.

X.2.3 Remblai :

Le remblai consiste à apporter et compacter des matériaux pour élever le terrain. Ces matériaux doivent répondre à des critères stricts de portance, granulométrie et humidité. Ils sont mis en œuvre en couches successives, nivelées et compactées selon des normes, pour assurer une assise stable et durable capable de supporter les charges dynamiques de la voie ferrée.

X.2.3.1 Conditions de réalisation des remblais :

La réalisation de remblais de qualité, sûrs, stables et durables nécessite le respect strict des conditions suivantes :

- Conformité obligatoire aux normes, notamment le GTR (Guide des Terrassements Routiers) et les spécifications techniques de la SNTF, pour garantir qualité et durabilité.
- Choix de matériaux adaptés, évitant les sols très plastiques des classes A4 et les roches évolutives (gypses, argilites, schistes). Les matériaux argileux ou limoneux sableux peuvent être utilisés si leur qualité est conforme.
- Mise en œuvre par couches successives compactées avec des critères précis : densité sèche $\gamma d \geq 95$ % de l'Optimum Proctor Modifié (OPM), module de déformation $EV2 \geq 45$ MN/m² pour sols fins, et $EV2 \geq 60$ MN/m² pour sols sableux et graveleux, afin d'assurer la stabilité et limiter les tassements.
- Mise en place d'une pente transversale minimale et d'un système de drainage performant pour prévenir toute accumulation d'eau et éviter l'affaiblissement du remblai.
- Contrôle régulier pendant la construction pour détecter et corriger rapidement tout problème susceptible de compromettre la stabilité.

X.2.4 Déblais :

Le déblai correspond à l'excavation maîtrisée des matériaux du terrain naturel afin d'abaisser le niveau du sol jusqu'à la cote définie par le projet. Cette opération permet d'adapter le relief aux exigences géométriques et structurelles de la plateforme ferroviaire.

X.2.4.1 Conditions d'excavation de déblai :

- Avant de commencer l'excavation, il faut bien étudier la nature du sol pour comprendre ses caractéristiques et ses risques.
- Il est important de vérifier la présence d'eau souterraine afin de prévoir des systèmes de drainage si nécessaire.
- La méthode d'excavation doit être choisie selon le type de sol et les contraintes du chantier.

- Les matériaux excavés doivent être triés et stockés correctement, puis évacués ou réutilisés selon les règles environnementales.
- Les talus doivent être taillés avec une pente adaptée pour éviter les effondrements. Si besoin, des soutènements temporaires doivent être installés.
- Un suivi régulier doit être mis en place pour détecter tout mouvement ou problème pendant l'excavation.
- Enfin, la sécurité du personnel est essentielle : il doit être formé, équipé et protégé tout au long des travaux.

X.2.4.2 Conditions d'excavabilité/rippabilité :

Selon la nature géologique et les caractéristiques mécaniques des matériaux de déblais, ils sont classés selon leur mode d'excavation :

- **Terrain meuble :** Terrains extractibles avec une pelle mécanique ou niveleuse.
- **Terrain semi-dur (rippable) :** Matériaux nécessitant l'emploi d'un ripper.
- **Terrain rocheux dur (non rippable) :** Matériaux nécessitant l'utilisation d'explosifs et/ou de brise-roche.

Pour notre projet, tous les terrains sont classés comme terrains meubles et peuvent être excavés par des engins de terrassement légers.

X.2.5 Pente des talus en déblai et en remblai :

Lors de la conception des ouvrages en terre, la stabilité des talus constitue un paramètre fondamental, que ce soit pour les déblais ou les remblais. Les inclinaisons retenues pour les pentes sont définies en fonction du rapport entre la base (V) et la hauteur (H), conformément aux recommandations du chapitre 07.2.2 « Ouvrages en terre » du référentiel technique de la SNTF.

Les pentes habituellement adoptées sont les suivantes :

Talus en déblai : 1/2, 2/3, 1/1, 3/2, 2/1, 2.5/1, 3/1.

Talus en remblai : 3/2, 2/1, 2/3.

Le choix de ces pentes repose sur une évaluation rigoureuse de plusieurs facteurs :

- Les caractéristiques mécaniques et hydriques des terrains en place (en déblai) et des matériaux utilisés pour les remblais ;
- La hauteur totale de l'ouvrage en terre ;
- Le relief naturel du site ainsi que les aléas environnementaux ou géologiques pouvant affecter la stabilité de l'ensemble.

Les pentes adoptées pour notre projet sont :

- **Cas remblais** : 2H/1V (2 horizontal pour 1 vertical).
- **Cas déblais :** 1H/3V pour les hauteurs.

Ces pentes sont établies pour assurer la stabilité globale en tenant compte des propriétés géotechniques des terrains, de la hauteur de l'ouvrage, de la configuration topographique et des risques naturels.

X.2.6 Étude de stabilité :

L'évaluation de la stabilité des ouvrages en terre constitue une étape essentielle pour assurer leur sécurité à court et à long terme. Elle repose sur l'analyse des propriétés mécaniques et hydrogéologiques des sols, notamment la densité apparente (γ), la cohésion (C) ainsi que l'angle de frottement interne (ϕ) de chaque horizon géotechnique. Critères de sécurité :

- Fs ≥ 1.5 à long terme.
- Fs ≥ 1.3 à court terme.
- Fs ≥ 1.0 en situation accidentelle (séisme).

Dans notre projet on a utilisé logiciel GEO 5.0 2020 afin de déterminer la stabilité des talus.

- **Cas remblai :** le calcul de stabilité concerne les grands remblais avec des hauteurs importantes (h ≥ 6 m),
  Dans notre cas (le plus défavorable) en prend en considération que le de remblai au Pk 626+175.
  Les caractéristiques des couches :

Tableau X-1: les caractéristiques du sol en place.

Matériaux	*γ Poids volumique (KN/m 3)*	*C Cohésion CD (KPa)*	*φ Cohésion CD (KPa)*
Remblai courant	20	5	30
Sol support (Calcaire)	21.5	208.5	42

Pour les calculs, on a utilisé les caractéristiques suivantes :

- Une charge ferroviaire de référence de 60KN/m.
- La vérification de stabilité est effectuée en conditions statique vu que la zone est classée en zone de sismicité nulle (Zone 0).
- Les calculs de stabilité sont réalisés en utilisant la méthode de Bishop.

Tableau X-2: Résultats du calcul de stabilité pour le remblai.

PK	H (m)	Pente du talus	Fs statique	
626+175	7,02	2H/1V	1 56	1.56>1.5 Acceptable

NB : Les résultats de calcul sont en **Annexe E.**

- **Cas déblai** : Les hauteurs de tous les déblais détectés le long du tracé sont faibles donc on n'a pas effectué le calcul de stabilité .

X.2.7 Protection des talus :

Compte tenu de la nature des sols rencontrés sur le tracé, une protection adaptée des talus en déblais et remblais est nécessaire pour garantir leur stabilité dans le temps. Une couche de terre végétale d'environ 0,30 m est donc appliquée en surface, accompagnée d'une végétalisation par des espèces adaptées aux conditions climatiques locales.

Cette protection a plusieurs fonctions :

- Limiter la dégradation des couches superficielles exposées aux intempéries.
- Réduire l'impact des agents climatiques tels que l'eau de pluie, le gel et l'ensoleillement excessif.
- Atténuer l'érosion liée au ruissellement et empêcher la formation de ravines.
- Favoriser une meilleure intégration des talus dans leur environnement naturel.

X.3 Les ouvrages :

L'optimisation du tracé ferroviaire nécessite de répondre simultanément à des exigences techniques, économiques et réglementaires. Pour ce faire, il est indispensable d'intégrer dans la conception l'ensemble des ouvrages fonctionnels imposés par les contraintes du terrain et les standards en application. Ainsi, le tracé doit inclure les ponts rails, les passages inférieurs, les ponts routiers, ainsi que les ouvrages hydrauliques et les dispositifs de protection. L'ensemble de ces éléments doit être conçu conformément aux prescriptions des normes UIC, SNTF et européennes, afin de garantir la sécurité, la durabilité et la compatibilité du projet avec les référentiels reconnus.

X.3.1 Influence sur le choix des ouvrages :

Le choix du type d'ouvrage est influencé par deux types de contraintes principales :

- **Données naturelles** : Débit d'eau, type de sol, conditions géotechniques, contraintes topographiques et climatiques.
- **Exigences techniques :** Portée nécessaire, type de charges, méthodes de fixation, gabarit, tirant d'air, adaptation architecturale régionale, et contraintes spécifiques de construction.

X.3.2 Le croisement route-rail :

Le problème de croisement doit prendre en compte la nature et le débit de la voie pour analyser chaque cas selon la vitesse de base maximale. Trois solutions sont envisageables :

- **Passage supérieur :** Utilisé pour les vitesses élevées et selon les contraintes topographiques.
- **Passage à niveau :** Interdit si la vitesse du train dépasse 100 km/h, sauf pour des pistes à faible débit.



Figure X-1: Passage à niveau (Infraworks).

- **Passage inférieur :** Rarement utilisé, seulement si la topographie l'exige.



Figure X-2: Passage inferieur (Infraworks).

X.3.3 Les ouvrages d'art du projet :

X.3.3.1 Rétablissement routier :

On ne prévoit pas de passages à niveau en raison de la vitesse de circulation de 160 km/h. Les intersections avec les chemins communaux ou routes nécessitent l'installation de passages supérieurs pour assurer un passage sécurisé au-dessus des voies ferrées.

Tableau X-3 : Liste de rétablissement routier.

PK de l'ouvrage	Obstacle à franchir	Ouvrages projeté
622+735	RN50	Passage supérieure

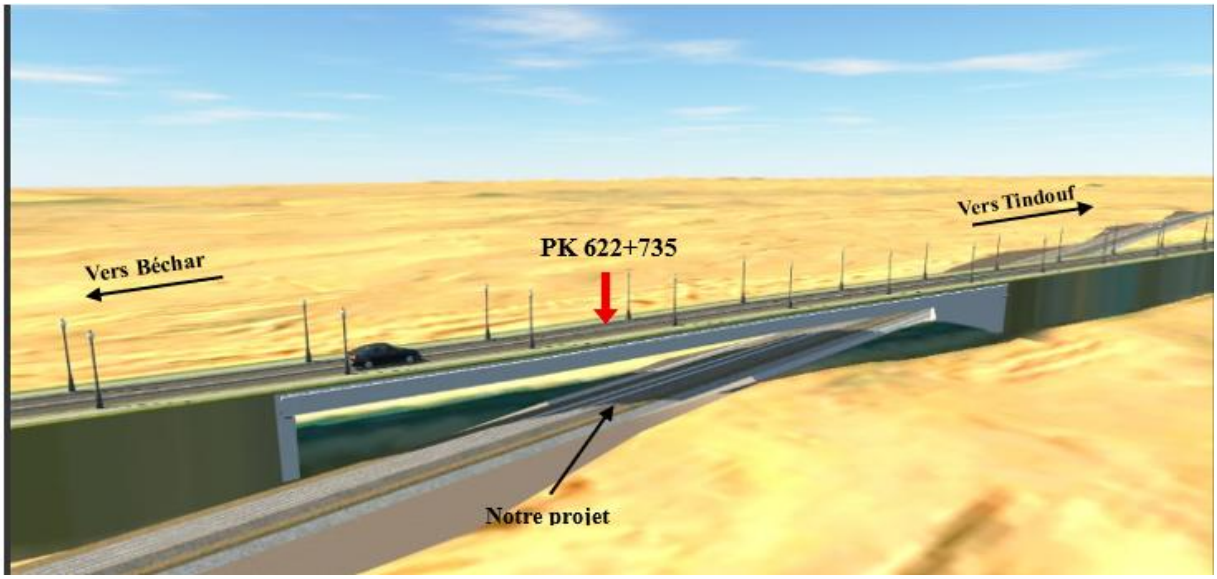


Figure X-3: Illustration du passage supérieur sur Infraworks.

X.3.3.2 Les ouvrages hydrauliques :

Selon l'importance des cours d'eau franchis, deux types d'ouvrages hydrauliques sont envisagés:

- **Buses :** Pour les cours d'eau de petite taille et à faible débit.
- **Dalots :** Pour les cours d'eau les plus importants et à grand débit.

Les ouvrages hydrauliques sont dimensionnés selon les études hydrologique et hydraulique (comme mentionné dans le chapitre VI.).

X.3.3.3 Protection des conduites électriques :

Dans le cadre de notre projet, le tracé ferroviaire intersecte des lignes électriques de basse, moyenne et haute tension. Afin d'assurer la sécurité des installations et des personnes, ainsi que la pérennité des réseaux, des solutions adaptées sont mises en œuvre pour le confinement et l'effacement de ces lignes. Le polyéthylène est particulièrement utilisé pour l'enfouissement des câbles HT et MT, en raison de sa haute résistance aux contraintes mécaniques, chimiques et thermiques.

Les traversées sont également protégées par des gaines rigides en acier ou en PVC, selon la tension et les contraintes du site, complétées par des dispositifs de signalisation et de repérage en surface. Cette approche garantit la conformité aux normes techniques et la sécurité opérationnelle du chantier et de l'exploitation future.

- Notre tracé traverse les lignes électriques comme illustre le tableau suivant :

Tableau X-4: Liste des lignes électriques à franchir.

Nature de réseau	PK	Situation sur PL
Ligne électrique moyennes tension MT	619+913	Remblai
	641+785	Remblai
Lignes électriques basses tension	641+525	Remblai

X.3.3.4 Protection des fibres optique :

Dans le cadre de notre projet, la solution retenue a consisté à procéder au déplacement des fibres optiques par le tracé, afin d'éviter toute interférence avec l'infrastructure ferroviaire projetée.

Tableau X-5: Liste Ligne des fibres optique à franchir.

Ligne des fibres optique	627+283
	628+442
	629+327

X.3.3.5 Protection des conduites d'AEP et EU :

Des conduites d'adduction eau potable et eaux usées ont été intersectées par le tracé du projet. Afin d'assurer leur intégrité et leur bon fonctionnement, des mesures de protection doivent être mises en œuvre. Celles-ci consistent soit en un déplacement contrôlé des conduites, soit en leur protection in situ au moyen de gaines de protection en acier ou en béton, conçues pour résister aux charges induites par les travaux et garantir la pérennité des réseaux.

Tableau X-6: Liste Conduites AEP et Conduites EU à franchir.

Conduites AEP (adduction en eau potable)	640+908
	641+670
Conduites EU (eau usée)	641+225

X.4 Conclusion :

L'importance capitale des travaux de terrassement et de construction des ouvrages d'art dans la réussite du projet ferroviaire entre PK 618+000 et PK 642+100 nécessite une attention méticuleuse aux détails et une coopération étroite entre tous les intervenants. Le respect rigoureux des spécifications techniques, des normes de qualité et des procédures de contrôle garantit la création d'un réseau ferroviaire sécurisé, fiable et efficace. L'investissement dans la qualité des terrassements et des ouvrages d'art contribue au développement durable des infrastructures de transport et au progrès de notre société moderne.

CHAPITRE XI

CONCEPTION DE LA GARE D'OUM EL ASSEL

CHAPITRE XI. CONCEPTION DE LA GARE D'OUM ASSEL :

XI.1 Introduction :

Dans un projet de chemin de fer, la gare symbolise un lieu public vivant et central où se rencontrent les rails et convergent les courants de passagers. C'est un point de connexion essentiel où les mouvements de départ et d'arrivée se coordonnent pour garantir la souplesse et l'efficacité du système de transport. Ce chapitre propose une analyse structurée de la conception des gares ferroviaires, en décrivant chaque phase du processus. Nous étudierons une gamme de critères, des facteurs techniques aux impératifs opérationnels, pour acquérir une connaissance approfondie des mesures requises pour construire des infrastructures efficaces, adaptées aux attentes des utilisateurs et des exploitants ferroviaires.

XI.2 Type de gare :

- **Gare voyageurs :** installation conçue pour l'accueil, l'embarquement et le débarquement des voyageurs. Elle englobe généralement des quais, un bâtiment pour les voyageurs, ainsi que les équipements d'accueil, de contrôle et d'information pour la gestion du flux de passagers.
- **Gare marchandises :** installation conçue pour les opérations de chargement, le déchargement et le transit des marchandises. Elle est équipée de voies de service, des quais.
- **Gare mixte :** lieu qui fusionne les rôles de gare pour voyageurs et de gare pour marchandises, fournissant simultanément des services aux voyageurs et pour le transport de fret
- **Gare de croisement :** lieu où les trains peuvent se croiser, être dépassés ou stationner temporairement, surtout sur les voies uniques, pour assurer une exploitation fluide et régulière.

XI.3 Étude de plan de masse d'une gare :

Lors de la création d'une gare ferroviaire, l'élaboration du plan de masse est une phase essentielle qui est déléguée au concepteur. Ce plan doit prendre en compte tous les éléments fondamentaux de l'infrastructure, en se basant sur trois critères techniques primordiaux :

- **Les catégories de voie :** elles conditionnent la structuration fonctionnelle de la gare en définissant le rôle opérationnel de chaque voie (voies principales, de service …) et détermine, en conséquence les composants nécessaires de la gare.
- **Trafic ferroviaire :** représente l'un des paramètres majeurs dans la conception d'une gare. Sa nature et son volume permet d'évaluer l'importance de la gare, de calibrer es infrastructures et d'assurer une exploitation fluide et efficace**.**
- **Emplacement :** il influence à la fois le type de trafic attendu et les catégories de voies à prévoir.

L'intégration de ces aspects techniques assure une conception appropriée, ce qui garantit l'efficacité et la fluidité des activités dans la gare.

XI.4 Aménagement de la gare :

XI.4.1 Les installations d'une gare à voyageurs :

- **le bâtiment de voyageurs** : Structure principale affectée à l'accueil des usagers, regroupant les fonctions de vente, d'information, de contrôle, de sécurité et les commodités liées au confort des passagers.

- **Les bâtiments à usages divers (B.U.D) :** regroupent les unités fonctionnelles destinées aux agents du chemin de fer, telles que les postes de signalisation, les bureaux d'exploitation et les locaux de supervision technique (les salles de contrôle et de surveillances).
- **Les quais :** sont des plateformes situées en bordure des voies, aménagées pour l'embarquement et le débarquement des voyageurs, généralement reliées au bâtiment voyageur par des cheminements adaptés tels que passerelles.
- **Les abris de quais :** sont des installations implantées sur les quais, conçues pour assurer la protection des voyageurs en attente contre les conditions climatiques défavorables (intempéries).
- **Les passages souterrains et les passerelles :** sont des structures intégrées à la gare, permettant aux voyageurs de franchir les voies en toute sécurité et d'accéder aux différents quais.

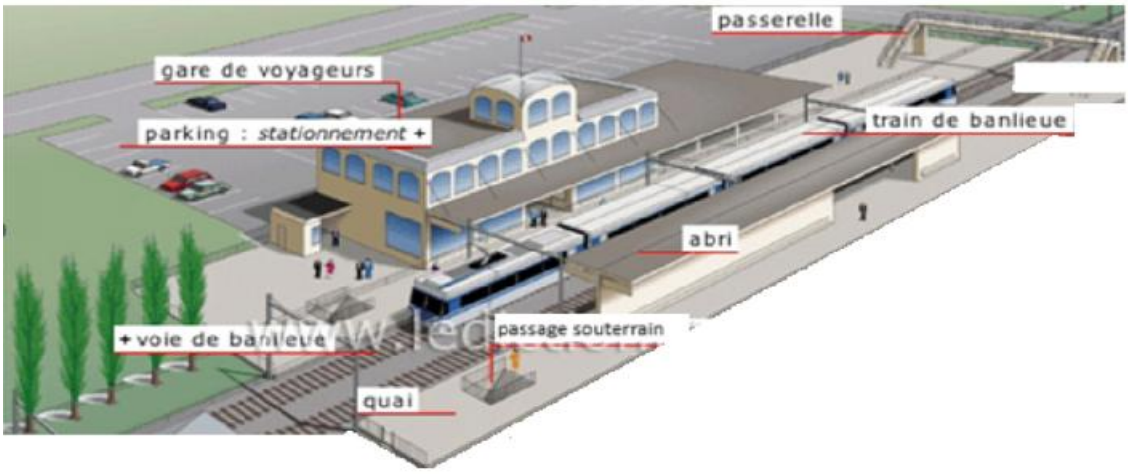


Figure XI-1: Les installations d'une gare à voyageurs.

XI.4.2 Marge de glissement à l'aval des signaux :

La marge de glissement est une section de voie située après un signal fermé, réservée au trajet du train, permettant d'éviter toute collision en cas de non-respect de l'arrêt, en assurant une distance de sécurité jusqu'à un obstacle éventuel.

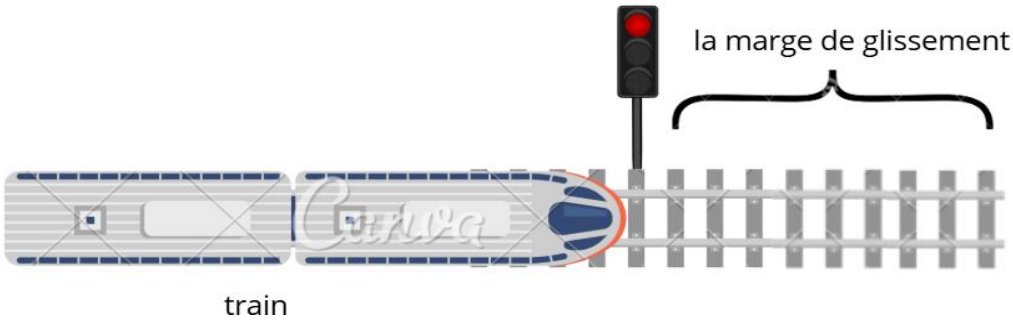


Figure XI-2: Schématisation de la marge de glissement.

XI.4.2.1 La longueur de la marge de glissement LG :

Selon la norme UIC 739, le tableau suivant donne La longueur de la marge de glissement LG :

Tableau XI-1: La longueur de la marge de glissement LG.

La longueur de la marge de glissement LG	Les conditions
50 à 200m	Selon la vitesse de la ligne, la marge est utilisée pour des signaux de protection, d'entrée, intermédiaires ou de sortie.
200m	Pour une vitesse V≥ 160 km/h
100m	Pour une vitesse 40 km/h ≤V≤ 60km/h
50 m	Pour une vitesse V ≤ 40 km/h

XI.4.3 Garage franc GF :

Le garage franc désigne la zone de sécurité entre deux voies convergentes au niveau d'un aiguillage, matérialisée par des bornes implantées sur le ballast. Cette zone indique la position maximale jusqu'où un train peut s'arrêter sans empiéter sur l'itinéraire adjacent, garantissant ainsi la sécurité des circulations simultanées. La distance théorique entre l'axe de la voie directe et celui de la voie déviée est de 3,57 mètres, mais la position réelle du garage franc est reculée d'un mètre en amont pour renforcer la marge de sécurité.

La formule de calcul est comme suite :

$$GF = (\mathbf{3.57}/\ \boldsymbol{N}) + 1$$

avec : N= varie en fonction de l'ouverture de l'appareil de voie (N=1/tan(α)).

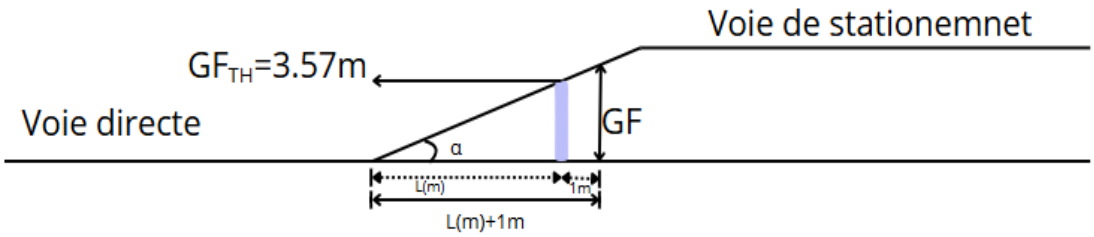


Figure XI-3: Schéma du garage franc.

XI.4.4 La longueur utile de la voie de stationnement Lu :

La longueur utile de la voie (Lu) représente l'intervalle requis pour accueillir un train à l'arrêt sur la voie de dépassement, sans compromettre la fluidité du trafic sur la voie principale ou les itinéraires voisins. Elle est déterminée par la distance séparant deux points de garage franc.

Cette longueur doit être suffisante pour permettre le stationnement, le croisement ou le dépassement des trains en toute sécurité. Selon la SNTF La longueur utile minimale est de :

- 426 m : pour les trains voyageurs.
- 870 m pour les trains de marchandise (pour la voie principale et la voie de service).

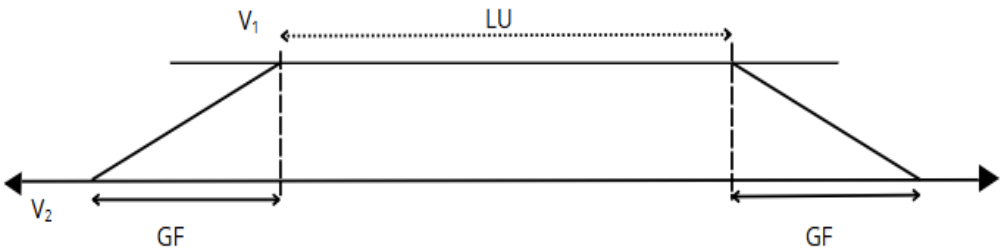


Figure XI-4 : Schéma illustratif de la longueur utile.

XI.4.5 Heurtoir :

C'est un dispositif implanté en bout de voie, destiné à immobiliser un train en cas d'arrêt insuffisant ou de dérive involontaire. Il a pour fonction de contenir le matériel roulant et d'en atténuer le choc, grâce à une structure équipée de tampons absorbant l'énergie cinétique au moment de l'impact.



Figure XI-5: Heurtoir.[35]

XI.5 Les caractéristiques géométriques de la gare :

XI.5.1 La déclivité dans les gares :

La déclivité au niveau de la gare doit être strictement conforme aux normes d'exploitation, en tenant compte des opérations qui y sont effectuées (embarquement, stationnement, manœuvres, …etc.). Dans le cadre de notre projet, une pente nulle (0 ‰) a été prévue afin de garantir la stabilité du matériel roulant et d'éviter tout déplacement non maîtrisé.

XI.5.2 Quai :

Un quai est un aménagement dans une gare ferroviaire, destinée à assurer l'embarquement et le débarquement sécurisé des voyageurs. les caractéristiques des quais, conformément aux normes définies par la SNTF, sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau XI-2 : Les caractéristiques du quai.

Largeur B (m)	Quai intermédiaire	B≥ 8m
	Quai extérieure	B≥6m
Longueur L (m)	Grand ligne	450m
	Service régionale	350m
Hauteur (mm)	Quai haut	550mm
	Quai bas	760mm

[35] https://fr.wikipedia.org/wiki/Heurtoir#/media/Fichier:Buffer_stop_in_Saint-R%C3%A9my-l%C3%A8s-Chevreuse_(France).jpg

Distance à l'axe de la voie (mm)	L= 1650 +S	La formule suivante donne la valeur de S : $S = \frac{3750}{R} + \frac{I - 1435}{2}$ R :rayon de la voie. I :(mm) :écartement de la voie (mm)
Entre axe de la quai (m)	Normal	e>11.3
	Minimal	e>9.3

Par rapport la hauteur de quai :

- H : hauteur au-dessus du plan de roulement, perpendiculaire au plan de roulement.
- L : distance par rapport à l'axe de la voie, parallèles au plan de roulement.

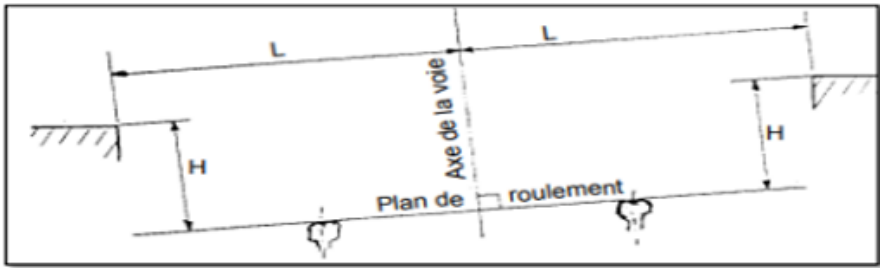


Figure XI-6:la hauteur du quai et la distance par rapport à l'axe de la voie.

XI.5.3 Les appareils de voie :

L'exploitation des voies ferrées nécessite des dispositifs pour relier et interconnecter les itinéraires, appelés appareils de voie (ADV). Un appareil de voie est un dispositif de guidage qui permet le passage d'une voie à une autre tout en assurant la continuité des voies par prolongement.

XI.5.3.1 Conditions générales :

Les appareils de voie et de communication doivent être installés avec une déclivité constante.

A proximité d'un ouvrage d'art, leur implantation doit respecter une distance minimale, proportionnelle à la longueur **L** de l'ouvrage, afin de garantir la sécurité structurelle et d'éviter toute interaction défavorable. Ces dispositions doivent être intégrées dès la phase de conception, conformément aux normes techniques en vigueur.

Tableau XI-3 : Longueur de l'appareil de voie.[36]

L_{min}	≥ 20 m	≥50 m	≥50 m
Longueur de l'appareil	L≤ 30m	30 m< L ≤90m	L >90m depuis le côté opposé à l'appareil de dilatation

[36] SNTF

XI.5.3.2 L'implantation des appareils de voie :

L'implantation des appareils de voie devra respecter les longueurs minimales définies pour le tracé en plan, conformément aux prescriptions indiquées ci-après.

Tableau XI-4: Règles d'implantation des appareils de voie.[37]

En pointe :	La longueur minimale d'alignement (L1) doit être égale à Vd/2, où Vd (km/h) est la vitesse de franchissement en voie déviée.
En talon de la branche déviée :	• **Si la sortie de l'appareil est alignée :** la longueur minimale d'alignement à respecter doit être égale à Vd/2. • **Si la sortie est en courbe,** il faut que : • Vd < 100 : il faudra prévoir soit un alignement d'une longueur minimale égale à Vd/2, soit prolonger la courbe de l'appareil suivi d'un raccordement progressif. • 100 ≤ Vd < 160 : il est recommandé de prolonger la courbe de la voie déviée par un raccordement progressif dans le même sens pour toute nouvelle situation. • Vd ≥ 160 : la condition précédente est obligatoire. Quelle que soit la valeur de Vd, la longueur des raccordements doit être calculée de manière à obtenir une variation maximale de l'insuffisance de dévers de ΔI/Δt de 75 mm/s (valeur normale) et 90 mm/s (valeur exceptionnelle).
En talon de la voie directe :	la longueur minimale d'alignement L2 doit être supérieure à 50 m.

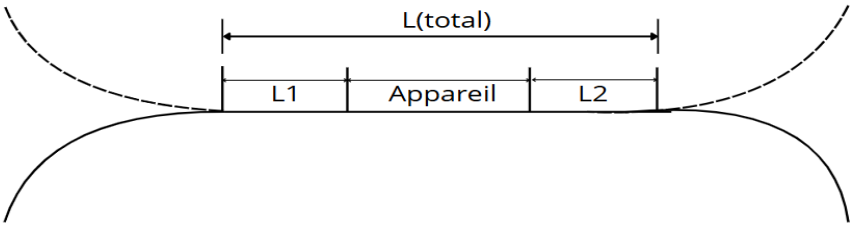


Figure XI-7: Schéma illustratif.

XI.6 Gare D'OUM ASSEL :

XI.6.1 Description de la gare :

La gare de Oum El Assel est située entre le PK 639+000 et le PK 642+100. Elle comprend un bâtiment voyageurs implanté au PK 640+600, ainsi que deux quais destinés à l'embarquement et au débarquement des voyageurs.

L'infrastructure est constituée de deux voies principales permettant à la fois le franchissement direct et les opérations d'évitement en gare. Ces voies sont conçues pour assurer une continuité du trafic, qu'il s'agisse de circulations sans arrêt ou de croisements planifiés.

En complément, la gare dispose de deux voies de service, assurant la prise en charge des opérations annexes et les besoins de régulation ou de stationnement. Ces voies sont connectées

[37] SNTF

à l'ensemble du plan de voies par des communications adaptées, permettant les manœuvres nécessaires à l'exploitation.

Deux voies tiroirs sont aménagées aux extrémités de la zone de service pour faciliter les opérations de remisage ou de retournement des engins.

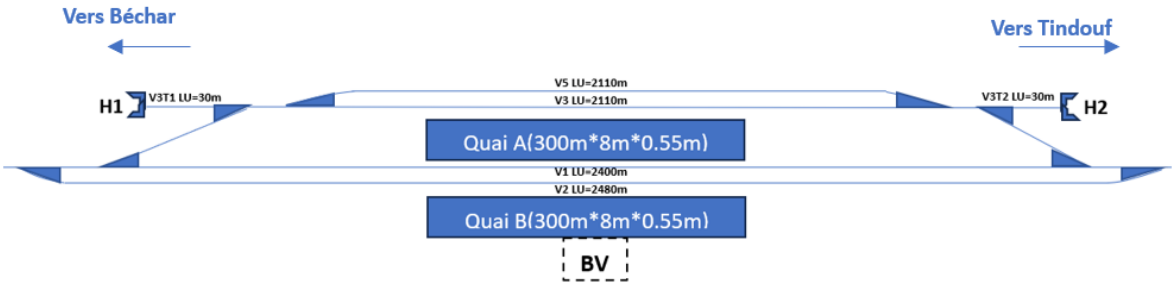
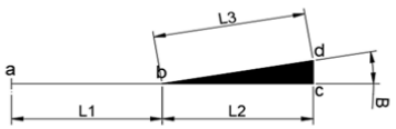


Figure XI-8 : Schéma de la gare Oum El Assel.

XI.6.2 Les caractéristiques de la gare d'OUM EL ASSEL :

Tableau XI-5 : Caractéristiques de la gare d'OUM EL ASSEL.

GARE						
PK		Louangeur		Nombre de voie		
PK 639+000 au 642+100		3100m		4 voies		
Longueurs utiles						
Voies	V1	V2	V3	V5	V3T1	V3T2
Lu (m)	2480m	2400m	2110m	2110m	30m	30m
Caractéristique de Quai A et Quai B						
PK		Largeur		Largeur		Hauteur
De PK640+450 au 640+750		300m		8m		0.55m
Appareil de voie						
Type	B°	GF(m)	L1(m)	L2(m)	L3 (m)	Vitesse max de la voie déviée (Km/h)
UIC60-E1-500-1/12	4.764	43.84	20.797	20.797	20.797	65
UIC60-E1-300-1/9	6.340	33.13	16.615	16.615	16.615	40
						
Heurtoir						

Implantation des Heurtoir	PK	X	Y
H1	639+585,648	700336,244	3167535,922
H2	641+975,000	698465,1781	3166050,322

XI.6.3 Assainissement de la gare :

XI.6.3.1 Assainissement transversale :

Pour assurer un drainage performant des eaux pluviales dans la gare, les quais doivent être conçus avec une pente longitudinale en toit de 2 % combinée à une inclinaison transversale de 4 % sur les plates-formes, favorisant ainsi un écoulement gravitaire efficace vers les dispositifs de collecte.

XI.6.3.2 Assainissement longitudinale :

Le drainage est assuré par un réseau de drains longitudinaux implantés avec une pente constante de 4‰, qui captent les eaux de ruissellement infiltrées dans le ballast et la plate-forme. Ces eaux sont ensuite évacuées vers le système d'assainissement via des regards de visite stratégiquement positionnés. Le dispositif comprend également des fossés, drains secondaires et collecteurs, conçus pour canaliser et conduire les eaux pluviales vers les ouvrages hydrauliques puis vers l'exutoire.

XI.6.3.3 Drainage des eaux de la plateforme :

Dans le cadre de l'assainissement de la plateforme, un dispositif de drainage a été mis en place à l'aide de conduites en PVC perforé, de diamètre 300 mm, destinées à assurer l'évacuation des eaux pluviales situées entre les voies ferrées. Ces tuyaux sont perforés sur leur partie supérieure afin de faciliter l'infiltration des eaux. Le système comprend également des regards de visite installés tous les 50 mètres le long de la tranchée drainante, permettant un accès aisé pour les opérations d'inspection et de maintenance. L'ensemble des eaux collectées est ensuite dirigé vers un exutoire naturel à travers des collecteurs en béton armé.

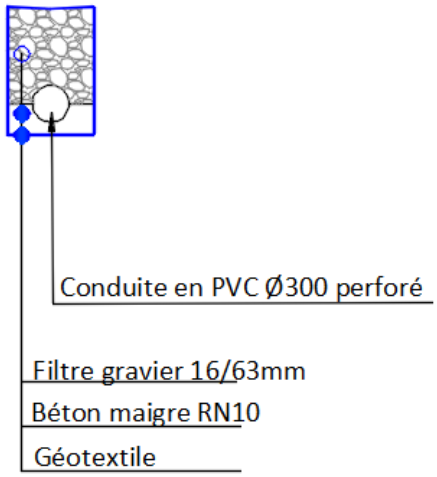
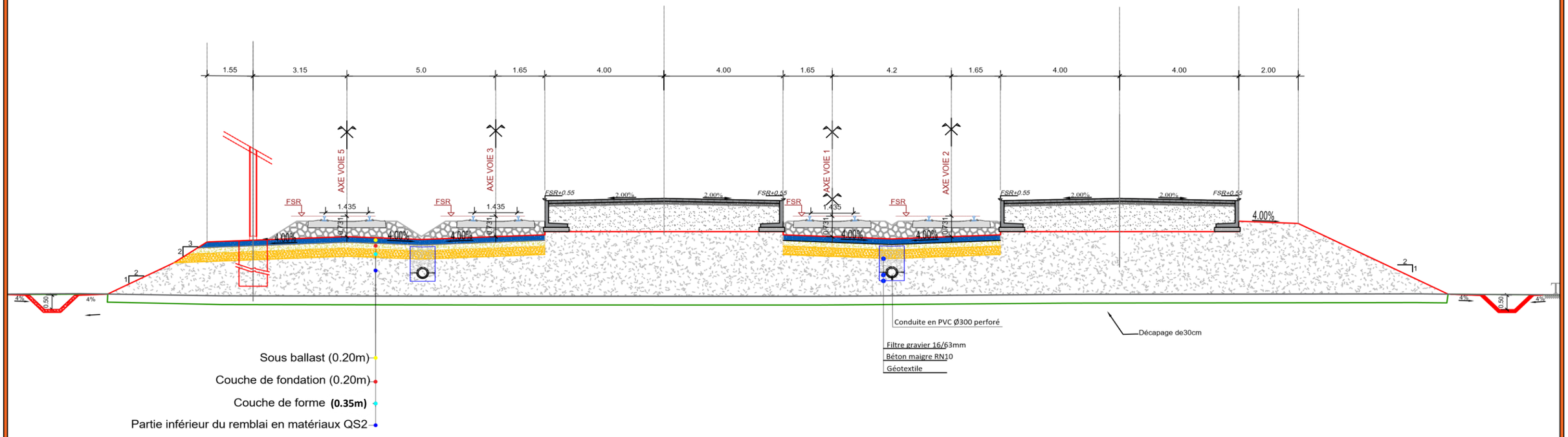


Figure XI-9: Ouvrage de drainage de la plateforme.

XI.7 Conclusion :

La gare constitue un nœud logistique essentiel, assurant le déplacement des usagers et le transport de fret dans des conditions optimisées. Sa conception moderne, soutenue par une gestion rigoureuse, garantit un fonctionnement régulier et performant. Les projets d'extension et de requalification en cours visent à accroître sa capacité d'accueil et à rehausser le niveau de service. Elle s'impose ainsi comme un vecteur structurant du développement territorial, tant sur le plan économique que social.

PROFIL EN TRAVERS TYPE EN GARE
(QUAI)



ENSTP

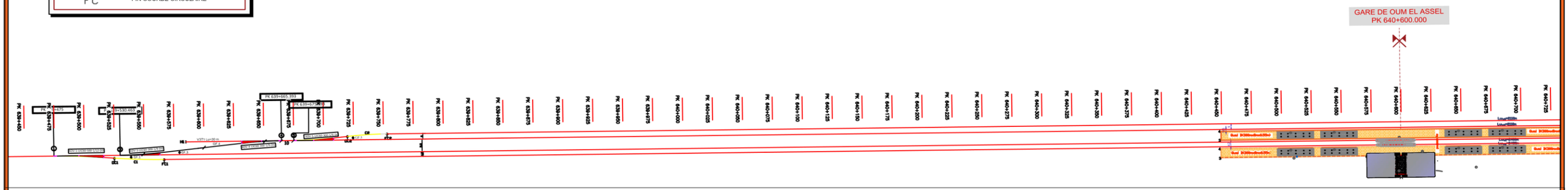
Adresse : Rue Sidi Garidi b.p. 32 Vieux Kouba -16051. Alger
Fax : (023) 70 19 38 Site web : www.enstp.edu.dz
Tel : (023) 70 19 04 E-mail : enstp@enstp.edu.dz

PROJET DE FIN D'ETUDES	Réalisé par	Encadré par	Echelle	N° Planche	Année universitaire
Etude en APD de la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique Béchar-Tindouf-Gara Djebilet du PK618+000 AU PK639+000 avec l'aménagement et la conception de la gare de OUM EL ASSEL	BRAIK Raounek BOUCHIREB Khawla	Mr.BENINAL Abdelaziz	1/100	PROFIL EN TRAVERS TYPE	2024 / 2025

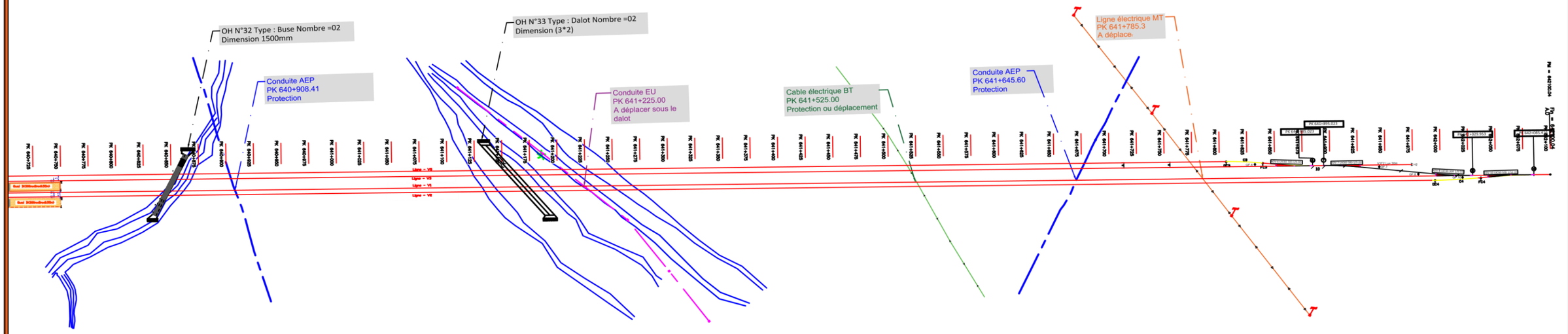
LEGENDE :

- AXE DE LA VOIE
- LIGNE MOYENNE TENSION
- LIGNE BASSE TENSION
- OUED
- CONDUITE E.U
- CONDUITE A.E.P
- APPAREIL DE VOIE
- QUAI
- HEURTOIR
- GARAGE FRANC N°...
- NUMERO DE COURBE AXE VOIE
- ORIGINE COURBE CIRCULAIRE
- FIN COURBE CIRCULAIRE

PARTIE 01



PARTIE 02



ENSTP

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

PROJET DE FIN D'ETUDES	Réalisé par	Encadré par	Echelle	N° Planche	Année universitaire
Etude en APD de la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique Béchar-Tindouf-Gara Djebilet du PK618+000 AU PK639+000 avec l'aménagement et la conception de la gare de OUM EL ASSEL	BRAIK Raounek BOUCHIREB Khawla	Mr.BENINAL Abdelaziz	1/1000	VUE EN PLAN GARE D'OUM EL ASSEL	2024/2025

CHAPITRE XI

SIGNALISATION FERROVIAIRE

CHAPITRE XII. SIGNALISATION FERROVIAIRE :

XII.1 Introduction :

La signalisation ferroviaire constitue un élément fondamental dans le développement du réseau ferroviaire. Elle joue un rôle indispensable dans la gestion du trafic, la prévention des accidents et la coordination efficace des opérations ferroviaires. Ce chapitre présente les concepts essentiels de la signalisation ferroviaire, examinant les différents types de signaux et les mécanismes de contrôle associés, où sécurité et fluidité opérationnelle demeurent prioritaires.

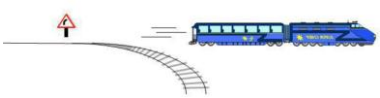
XII.2 Le rôle des installations de signalisation :

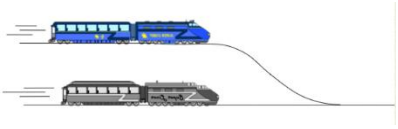
Les installations de signalisation ferroviaire remplissent des fonctions critiques qui dépassent la simple transmission d'informations. Elles constituent l'épine dorsale d'un système intégré visant à :

- Optimiser les flux de circulation en régulant dynamiquement le trafic, évitant les congestions et maximisant l'utilisation de la capacité infrastructurelle.
- Sécuriser l'exploitation en transmettant aux conducteurs des informations précises et en temps réel sur l'état de la voie, les limitations temporaires et les conditions de circulation, leur permettant d'adapter leur conduite de manière proactive.
- Prévenir les collisions sur les lignes bidirectionnelles à voie unique grâce à des enclenchements logiques qui établissent des protocoles rigoureux de priorité et de succession des trains.
- Protéger l'ensemble des intervenants en garantissant la sécurité des voyageurs, du personnel ferroviaire et des marchandises transportées via des systèmes de détection d'anomalies et de procédures d'arrêt d'urgence.
- Assurer une communication opérationnelle continue entre les trains en circulation et les centres de régulation, permettant une supervision centralisée et des interventions rapides en cas d'incident.

XII.3 Les risques ferroviaires :

La sécurité des trains dépend d'abord d'un bon repérage de tous les dangers possibles et de la mise en place de solutions adaptées pour les réduire. Le tableau suivant montre les principaux risques dans le transport ferroviaire que les systèmes de signalisation aident à prévenir :

Risque	Description	Représentation visuelle
Nez-à-nez	Collision frontale entre deux trains circulant en sens opposés sur une même voie.	
Rattrapage	Collision par l'arrière lorsqu'un train rejoint et percute un train plus lent circulant dans le même sens.	
Déraillement	Sortie des rails causée par une vitesse excessive dans une courbe ou une zone à restriction temporaire.	

Choc extérieur	Collision à un point de convergence entre un train et un obstacle ou un autre véhicule.	
Prise en écharpe	Collision latérale survenant lorsque deux trains se croisent à une intersection de voies.	

Cette liste des dangers montre pourquoi les feux et signaux sur les voies sont si importants. Comme une ceinture de sécurité pour les trains, les systèmes de signalisation détectent ces problèmes avant qu'ils n'arrivent et avertissent les conducteurs à temps. Ils fonctionnent comme des gardiens invisibles qui surveillent constamment où se trouve chaque train et s'assurent que les aiguillages sont bien positionnés.

XII.4 Fonctions des signaux :

Les signaux ferroviaires jouent un rôle essentiel dans la sécurité et la gestion du trafic ferroviaire. Ils remplissent principalement trois fonctions :

- **Signalisation d'arrêt :** Elle indique au mécanicien qu'il doit s'arrêter à un point précis. Ce type de signal est utilisé pour éviter les collisions, protéger les zones de manœuvre ou réguler la circulation sur les voies. Il peut s'agir d'un arrêt permanent ou temporaire selon la situation.
- **Signalisation de limitation de vitesse :** Ce signal informe le mécanicien qu'il doit réduire la vitesse du train à un certain niveau. Cela peut être nécessaire dans des zones sensibles : courbes serrées, ponts, zones de travaux, gares, etc. Il s'agit d'un rappel important pour assurer la sécurité du matériel roulant, de la voie et des personnes.
- **Signalisation de direction :** Elle sert à indiquer au mécanicien quelle direction suivre, surtout lorsqu'il existe plusieurs itinéraires possibles, comme dans les bifurcations, les embranchements ou les gares. Elle permet de guider le train vers la bonne voie sans risque d'erreur.

Chaque fonction de signalisation est généralement représentée par deux types de signaux :

- Les signaux d'annonce, qui préviennent le mécanicien à l'avance.
- Les signaux d'exécution, qui confirment ou imposent l'action (arrêt, ralentissement, changement de direction).

XII.5 Implantation longitudinale :

Pour assurer une conduite sécurisée, les signaux doivent être implantés de manière stratégique le long de la voie. L'objectif est de laisser au mécanicien le temps nécessaire pour réagir face à un signal d'arrêt ou une limitation de vitesse. Cette implantation dépend principalement de deux paramètres :

- **La distance d'arrêt :** Elle correspond à la longueur nécessaire pour qu'un train puisse s'arrêter complètement après avoir vu un signal d'avertissement. Cette distance est calculée en tenant compte du profil en long de la voie (pentes, déclivités) ainsi que du type de train.
- **La distance de ralentissement :** Il s'agit de la distance requise pour que le train puisse passer progressivement de sa vitesse d'approche à la vitesse imposée par le signal. Elle

dépend de la vitesse maximale autorisée, du type de freinage et des caractéristiques techniques du matériel roulant.

Ces deux distances permettent de définir l'emplacement optimal des signaux d'annonce par rapport aux signaux d'exécution. Ainsi, le mécanicien dispose d'un temps de réaction suffisant pour adapter sa conduite en toute sécurité.

XII.6 Types de signaux ferroviaires :

La signalisation mise en place pour le contournement Béchar–Tindouf repose sur un système codifié, conçu pour assurer une lecture rapide et une interprétation fiable par les conducteurs. Les principaux signaux utilisés sont normalisés et répondent aux exigences de sécurité et d'exploitation ferroviaire.
L'ensemble de ces signaux est présenté en **Annexe [H]**.

XII.7 Types de blocs :

Le système de bloc est un dispositif essentiel pour gérer l'espacement entre les trains et garantir la sécurité de la circulation. Il repose sur un principe fondamental : un seul train à la fois par canton (section de voie). Il existe plusieurs types de blocs, adaptés au niveau de trafic et à l'infrastructure de la ligne :

- **Bloc Manuel (B.M.)** : Utilisé principalement sur les lignes à faible fréquentation. Le passage d'un train d'un canton à un autre nécessite l'intervention d'un agent de circulation, qui autorise manuellement le franchissement. Ce système repose donc sur la coordination humaine entre les postes.
- **Bloc Automatique à Permissivité Restreinte (B.A.P.R.)** : C'est un système semi-automatique adapté aux lignes à trafic modéré. Il permet, dans certains cas et sous conditions strictes, de franchir un signal fermé (rouge), notamment en cas d'arrêt prolongé. Cela assure une meilleure fluidité tout en maintenant la sécurité.
- **Bloc Automatique Lumineux (B.A.L.)** : Ce système est largement utilisé sur les lignes à fort trafic. Il repose sur des cantons courts et une signalisation lumineuse automatisée, permettant un espacement dynamique entre les trains. La signalisation est progressive et s'adapte à la position des trains en temps réel, ce qui permet d'augmenter la cadence tout en assurant un haut niveau de sécurité.
- **Système de cantonnement** : Quel que soit le type de bloc, la ligne est divisée en cantons protégés par des signaux d'arrêt. Le principe de base est simple : deux trains ne peuvent pas circuler dans le même canton en même temps. Ce découpage permet de gérer efficacement le trafic et d'éviter les collisions.

XII.8 Principe de cantonnement :

Le canton est l'unité de base de la sécurité ferroviaire. C'est une portion de voie délimitée par des signaux, conçue pour ne laisser circuler qu'un seul train à la fois. Le cantonnement garantit ainsi un espacement minimum entre les trains circulant dans la même direction sur une même voie.

Fonctionnement technique :

- Lorsqu'un train entre dans un canton, les essieux métalliques de ses roues font contact entre les deux rails, créant un court-circuit électrique.
- Ce court-circuit est détecté par le système de signalisation, qui sait alors qu'un train occupe ce canton.
- En conséquence, le signal d'entrée du canton devient rouge, interdisant à tout autre train d'y pénétrer.

- Lorsque le train a complètement quitté le canton et est entré dans le suivant, le signal redevient vert, autorisant l'accès à un nouveau train.

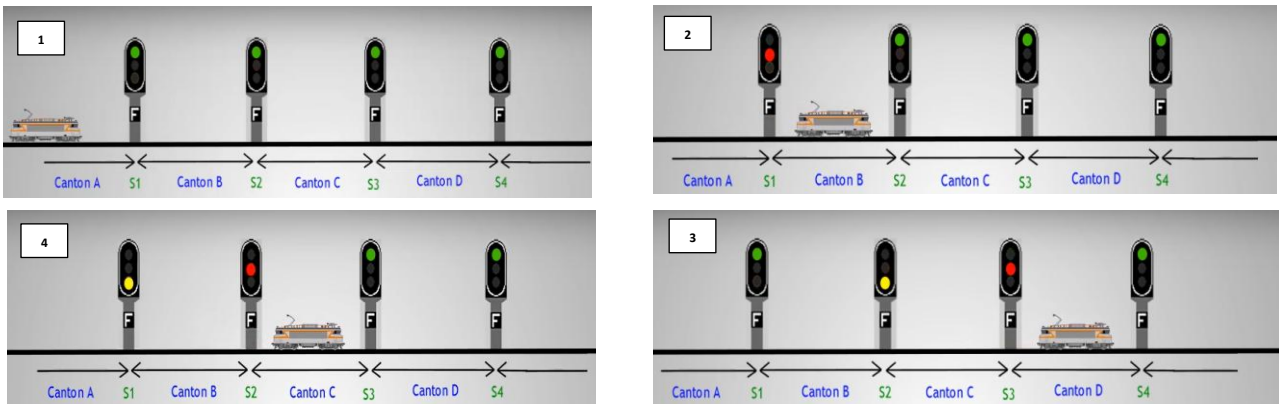


Figure XII-1 : principe de système de cantonnement.

Ce système garantit une "bulle de sécurité" autour de chaque train en circulation.

XII.9 Système de signalisation moderne ERTMS :

L'ERTMS (*European Rail Traffic Management System*) est un système moderne de signalisation développé pour harmoniser les réseaux ferroviaires européens. Il vise à améliorer la sécurité, la capacité et l'interopérabilité entre les trains des différents pays.

Il repose sur l'ETCS (*European Train Control System*), un système de contrôle des trains décliné en trois niveaux :

- **ETCS Niveau 1 :**

Ce niveau s'appuie sur des balises au sol (balises Eurobalises) qui transmettent ponctuellement les informations de signalisation au train. La signalisation latérale (feux, panneaux) est toujours présente et continue d'être utilisée. Ce niveau permet de moderniser progressivement les lignes existantes.

- **ETCS Niveau 2 :**

Il introduit une transmission continue des informations par radio (via le réseau GSM-R). Les signaux physiques en bord de voie ne sont plus indispensables : le mécanicien reçoit directement en cabine les autorisations de circulation, les limitations de vitesse et autres informations essentielles.

- **ETCS Niveau 3 :**

C'est la version la plus avancée. Elle repose sur un cantonnement mobile, c'est-à-dire que la position exacte des trains est connue en temps réel grâce à des systèmes de localisation embarqués et à la communication radio continue. Cela permet de supprimer complètement les signaux fixes et d'optimiser au maximum l'utilisation de la voie, en augmentant la fréquence des trains en toute sécurité.

L'intégration des communications radio et des systèmes de localisation embarqués ouvre la voie à une automatisation accrue et à une meilleure exploitation des infrastructures, essentielle pour répondre aux exigences des réseaux à haute densité.

XII.10 Application au projet :

La ligne ferroviaire Béchar–Tindouf, conçue pour des trains voyageurs à 160 km/h et des trains de marchandises à 70 km/h, utilise une signalisation moderne et fiable pour assurer sécurité et efficacité. Le système combine :

- Le BAL (Block Automatique Lumineux), qui gère la circulation par cantons fixes grâce à des signaux lumineux latéraux.
- L'ERTMS niveau 1, qui transmet en cabine les informations de signalisation via des balises Eurobalises, améliorant la supervision continue des trains.

La gestion des circulations repose sur une commande centralisée par tronçon, avec une possibilité de reprise locale, notamment dans les zones d'enclenchement. Les gares voyageurs sont pilotées depuis des postes centraux, tandis que les gares marchandises ont une commande locale sous contrôle central.

Pour l'enclenchement, deux solutions sont proposées : des systèmes informatisés (PAI) ou des enclenchements à relais classiques (PRG) avec commande numérique, assurant à la fois flexibilité et robustesse.

Le système utilise des compteurs d'essieux pour la détection fiable des trains. La communication entre équipements s'appuie sur un réseau moderne combinant fibres optiques et radio Sol-Train, garantissant rapidité et continuité des échanges.

Enfin, la maintenance est centralisée avec des équipes en gares pour intervenir rapidement, et l'alimentation électrique est sécurisée par le réseau public, complété par batteries et groupes électrogènes de secours.

XII.11 Conclusion :

La mise en place d'un système de signalisation combinant le BAL et l'ERTMS niveau 1 sur la ligne Béchar–Tindouf illustre l'engagement vers une modernisation efficace du réseau ferroviaire algérien. Cette approche technique, alliant sécurité renforcée, gestion optimisée des circulations et compatibilité avec les standards européens, permet d'améliorer la capacité et la fiabilité du trafic voyageurs et marchandises. Grâce à une architecture centralisée, une détection précise des trains et une communication moderne, le projet assure une exploitation durable et sécurisée, répondant aux exigences croissantes du transport ferroviaire contemporain.

CHAPITRE XII

ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

CHAPITRE XIII. ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT :

XIII.1 Introduction :

Le tracé ferroviaire projeté entre Béchar, Tindouf et le gisement de Gara Djebilet s'inscrit dans une politique de valorisation des ressources minières et de renforcement des connexions régionales. En facilitant le transport du minerai de fer, il contribue à la dynamisation économique des zones isolées et à l'amélioration de la logistique nationale.

Avant sa réalisation, une analyse environnementale et sociale s'impose pour anticiper les effets potentiels sur les écosystèmes et les communautés. Cette étude permet de cerner les interactions entre le projet et le milieu naturel, en tenant compte de la faune, de la flore, des ressources en eau ainsi que des équilibres sociaux locaux. Elle propose, sur la base de diagnostics techniques, des solutions concrètes pour prévenir, réduire ou compenser les impacts négatifs, dans le respect des normes environnementales applicables.

XIII.2 Cadre juridique et réglementaire applicable :

La réalisation de ce projet ferroviaire s'inscrit dans le respect du socle législatif et réglementaire encadrant la gestion environnementale en Algérie. Ce corpus normatif constitue la base juridique garantissant une prise en compte rigoureuse des enjeux écologiques dans tout projet d'aménagement du territoire.

L'Algérie a adopté une politique de développement durable reposant sur la protection des ressources naturelles et la préservation des écosystèmes. Afin de répondre à ces objectifs, plusieurs textes réglementaires encadrent les activités susceptibles d'avoir un impact environnemental, notamment les projets d'infrastructure à grande échelle.

Le tableau suivant présente une sélection des principales références légales et réglementaires à considérer dans le cadre du projet :

Tableau XIII-1 Références législatives et réglementaires encadrant la gestion environnementale.

Domaine concerné	Textes juridiques de référence
Protection de l'environnement et développement durable	- Loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. - Loi n° 01-20 du 12 décembre 2001 portant sur l'aménagement du territoire et la promotion du développement durable.
Études d'impact environnemental	- Décret exécutif n° 90-78 du 27 février 1990 relatif aux modalités de réalisation des études d'impact sur l'environnement. - Décret exécutif n° 07-145 du 19 mai 2007 fixant les conditions d'élaboration et d'approbation des études et notices d'impact environnemental.
Protection de la faune et de la flore	- Ordonnance n° 06-05 du 15 juillet 2006 portant sur la protection des espèces animales menacées. - Décret exécutif n° 12-235 du 24 mai 2012 établissant la liste des espèces animales non domestiques protégées.

Patrimoine culturel et sites archéologiques	- Loi n° 98-04 du 15 juin 1998 relative à la sauvegarde du patrimoine culturel national.

L'ensemble de ces dispositions traduit l'engagement de l'Algérie à intégrer les préoccupations environnementales dans les politiques d'aménagement du territoire. Leur application dans le cadre du présent projet garantit une approche conforme aux normes nationales et favorise un développement territorial durable et équilibré.

XIII.3 Objectifs de l'étude d'impact environnemental :

L'étude d'impact environnemental vise à intégrer, dès les phases initiales de conception, les enjeux liés à la préservation des milieux naturels et humains dans le développement de la nouvelle infrastructure ferroviaire. Ses principaux objectifs sont les suivants :

- Assurer l'intégration du projet dans son contexte écologique et territorial, en tenant compte des contraintes physiques, biologiques et paysagères du site.
- Analyser les effets directs, indirects, temporaires et permanents du projet sur l'environnement naturel (sols, ressources en eau, biodiversité), ainsi que sur le climat acoustique et visuel.
- Détecter les risques environnementaux potentiels susceptibles de nuire à la stabilité des écosystèmes.
- Élaborer un plan de gestion environnementale, comprenant des mesures préventives, correctives et compensatoires visant à réduire l'empreinte écologique du projet.
- Garantir la conformité du projet aux cadres réglementaires nationaux et internationaux en matière de protection de l'environnement.

XIII.4 Aperçu générale :

XIII.4.1 Situation géographique et administrative de la wilaya de Tindouf :

- **Superficie** : Environ 159 000 km²
- **Limites administratives** :

- Au Nord par le royaume du Maroc.
- Au Nord–Est par la wilaya de Béchar.
- Au Sud-Ouest par la Mauritanie.
- Au Sud-Est par la Wilaya d'Adrar.
- A l'Ouest par le territoire du Sahara occidental.

Tableau XIII-2 : Situation administrative de la wilaya de Tindouf

Aspect	Détails
Population	Environ 58 193 habitants (RGPH 2008)
Densité	~0,37 habitants/km²
Communes	2 (Tindouf, Oum El Assel)
Daïras	1 (Tindouf)

XIII.5 Analyse de l'état initiale de la zone d'étude :

Tableau XIII-3 : Milieu physique.

Type	Description
Climat	La wilaya de Tindouf s'inscrit dans le domaine saharien hyper aride, caractérisé par un climat désertique extrême, une faible pluviométrie et une végétation clairsemée.
Géomorphologie et topographie	La wilaya de Tindouf se caractérise par un relief dominé par une vaste dépression, dite dépression de Tindouf, qui divise le territoire en deux grandes unités morphologiques : • Au nord, on distingue une zone sédimentaire comprenant la Hamada du Draa, la Grande Sebkha et le massif d'Ouarkziz. • Au sud, s'étend le pays du Yetti-Eglab, séparé du nord par l'Erg Igudi, considéré comme l'un des ergs les plus humides du Sahara algérien. Cette zone constitue une aire privilégiée pour le nomadisme saisonnier, notamment durant l'été.
Géologie et Hydrogéologie	La wilaya de Tindouf présente une structure géologique marquée par la présence de formations paléozoïques et d'un socle cristallin. Trois entités principales composent ce territoire : un plateau gréseux au nord-ouest, un second plateau au sud-est composé de grès stratifiés, et une zone déprimée centrale résultant de processus érosifs, accueillant une sebkha à forte salinité.
réseau hydrographique	Dans la région de Tindouf, le régime hydrographique est fortement influencé par le climat désertique. Les écoulements sont occasionnels et surviennent uniquement lors d'épisodes pluviométriques intenses. Les ressources en eau sont localisées et limitées, principalement observées dans les zones où les précipitations sont légèrement plus marquées, notamment aux abords de la hamada du Draa et des escarpements du Hank.
Sismicité	La wilaya de Tindouf est située en **zone sismique 0**, selon le zonage établi par le Règlement Parasismique Algérien (RPA 2024), indiquant une sismicité très faible.

Tableau XIII-4 : Milieu biologique.

Type	Description
Flore	La zone d'étude, située dans le Sahara nord-occidental, se caractérise par une végétation steppique dominée par des espèces xérophiles telles que Haloxylon scoparium, Fredolia aretioides, Acacia raddiana, Retama retam et l'arganier, bien adaptées aux conditions arides de la région.
Faune	La faune locale se compose principalement de chameaux et chèvres domestiques. La faune sauvage inclut des reptiles comme le Fouette-queue et la Vipère à cornes, le scorpion Androctonus australis, ainsi que des mammifères tels que le dromadaire, le fennec, diverses gazelles et le guépard saharien. Les oiseaux emblématiques comprennent le Ganga de Lichtenstein et l'outarde houbara, adaptés au milieu désertique.

Tableau XIII-5 : Milieu humain.

Type	Description
Les infrastructures de base existantes	Réseau routier devers : RN. CW. CC. Réseau aéroportuaire : un aéroport de national à Tindouf.
L'industrie	La wilaya de Tindouf dispose d'une zone d'activité industrielle aménagée sur une superficie de 46 hectares. Située à proximité du chef-lieu de wilaya, cette zone vise à accueillir des projets économiques diversifiés, notamment dans les domaines de la transformation agroalimentaire, des matériaux de construction et des services logistiques. Elle bénéficie d'un raccordement aux principales infrastructures de base, telles que l'électricité, l'eau et les voies d'accès.
Tourisme	Le tourisme dans la wilaya de Tindouf repose sur la richesse de son patrimoine saharien et culturel. Parmi les sites remarquables figurent la citadelle des Portugais, les tombes funéraires et les zones naturelles comme Oum Taoubaa. L'artisanat local, notamment le tissage et la poterie, ainsi que la gastronomie traditionnelle, constituent également des atouts touristiques.
Agriculture	La wilaya de Tindouf possède un vaste potentiel agricole de plus de 6 millions d'hectares, mais seule une faible portion est exploitée (environ 184 500 ha), principalement en parcours. La superficie agricole utile, très limitée (872 ha), est majoritairement irriguée (94 %). Cette sous-exploitation souligne la nécessité d'intensifier le développement agricole pour mieux répondre aux besoins locaux.

XIII.6 L'impact du projet :

XIII.6.1 Impact négatifs et mesures d'atténuation proposées :

Les effets négatifs correspondent aux conséquences indésirables d'un projet pouvant nuire à l'environnement, à la santé, à la sécurité, à l'économie ou au bien-être des populations. Le tableau suivant présente une analyse de ces impacts, leur gravité estimée, ainsi que les solutions envisagées pour les atténuer.

Tableau XIII-6 : Analyse des impacts négatifs du projet et propositions de mesures correctives.

Catégorie d'impact	Impacts négatifs	Solutions d'atténuation proposées
Le sol	• Pollution des sols par effluents et déversements accidentels. • Dégradation physico-chimique des sols. • tassement des sols par trafic ferroviaire et engins et l'aggravation des phénomènes d'érosion. • Réduction de la perméabilité et de l'infiltration.	• Ajustement du tracé et du profil en long de la ligne ferroviaire afin de limiter les terrassements et réduire l'empreinte au sol. • Réduction des volumes de déblais et remblais pour minimiser les perturbations physiques du sol. • Application de techniques de stabilisation des sols (ex. : enrochement, géotextiles) pour limiter l'érosion et préserver la structure pédologique.
L'air	• Émissions atmosphériques des moteurs thermiques : CO, CO_2, NO_x, SO_2, HC, CH_4. • Génération de poussières fines lors des opérations de terrassement, transport et manutention de matériaux. • Dégagements volatils issus des solvants, peintures et produits d'étanchéité. • Pollution de l'air ambiant par les gaz d'échappement des engins et camions. • Risques sanitaires et visuels liés à la concentration de polluants et particules en suspension. • Nuisances olfactives ponctuelles selon les activités et conditions météorologiques.	• Arroser régulièrement les zones de travail pour limiter la poussière. • Couvrir les camions transportant des matériaux pulvérulents. • Stabiliser les voies d'accès pendant la saison sèche ou par vent fort. • Réduire les émissions en entretenant régulièrement les moteurs. • Utiliser du matériel à traction électrique pour limiter les gaz à effet de serre. • Optimiser l'organisation du chantier pour minimiser les sources d'émissions .

Eau (superficielle / souterraine)	• Risque de contamination des eaux superficielles par ruissellement de sédiments, huiles et produits chimiques. • Pollution potentielle des eaux souterraines en cas de fuites d'hydrocarbures ou d'accidents mécaniques. • Altération de la qualité de l'eau affectant la faune et la flore aquatiques. • Abaissement du niveau des nappes phréatiques lié aux opérations de pompage.	• Limiter les interventions dans les zones à forte sensibilité écologique. • Protéger les puits, forages et nappes contre toute contamination. • Réaliser un suivi régulier des eaux (analyses physico-chimiques et biologiques). • Éviter l'usage de produits chimiques près des zones sensibles. • Nettoyer le matériel loin des lits d'oueds et zones humides.
Flore et Faune	• Fragmentation et altération des habitats naturels. • Perturbation de la faune due aux nuisances sonores et aux vibrations. • Stress et déplacement des espèces sensibles, notamment les mammifères. • Risque de destruction directe de nids, terriers ou zones de reproduction. • Modification des conditions écologiques locales (lumière, humidité, sol). • Diminution de la biodiversité par perte d'espèces végétales et animales.	• Clôturer les zones de travaux pour empêcher l'intrusion de la faune. • Végétaliser les talus en déblais et remblais pour limiter l'érosion et l'impact paysager. • Éviter les zones écologiquement sensibles lors de la planification du tracé. • Réduire la vitesse des trains dans les zones à forte sensibilité écologique. • Intégrer des corridors écologiques pour maintenir la connectivité des habitats.
Milieux humain	• Nuisances sonores affectant le sommeil et la concentration des riverains. • Dégradation de la qualité de vie en zone résidentielle. • Perturbation du comportement de la faune locale par les émissions sonores. • Risques accrus d'accidents en zone de chantier et à proximité des voies. • Exposition du personnel et des habitants aux dangers liés aux engins et circulations.	• Équiper les machines de dispositifs d'insonorisation efficaces. • Limiter les travaux bruyants aux heures diurnes. • Utiliser des engins conformes aux normes acoustiques. • Réaliser une étude acoustique pour définir l'emplacement des écrans antibruit. • Interdire l'accès au chantier aux personnes non autorisées. • Aménager des passages protégés pour les piétons et les véhicules. • Mettre en place une signalisation renforcée autour des zones de travaux.

XIII.6.2 Les Impacts positifs :

Tableau XIII-7 : Analyse des impacts positifs du projet.

Catégorie	Impacts positifs
Direct - Socio-économique	• Génération d'emplois locaux durant les phases de construction et d'exploitation. • Renforcement du tissu économique par l'essor des activités liées à la logistique et aux services. • Amélioration de l'accessibilité aux services essentiels pour les populations enclavées. • Développement des opportunités d'investissement le long du corridor ferroviaire.
Direct – Transport	• Raccourcissement des temps de parcours grâce à une infrastructure moderne et efficace. • Optimisation du transport des minerais (notamment le fer), réduisant les coûts logistiques. • Réduction de la pression sur le réseau routier à travers le transfert modal vers le rail.
Indirect – Environnemental	• Diminution des émissions de gaz à effet de serre par la substitution du transport routier par le ferroviaire. • Baisse du risque d'accidents de la circulation et amélioration de la sécurité routière. • Réduction de la dégradation des routes due au trafic lourd de camions.
Indirect - Développement local	• Dynamisation du tourisme à travers un meilleur accès aux zones naturelles et culturelles. • Valorisation des zones défavorisées par l'intégration dans un réseau de transport structurant.
Phase d'exploitation	• Amélioration continue des performances logistiques à travers une gestion plus rationnelle des flux ferroviaires. • Modernisation du système de transport national grâce à l'introduction de technologies ferroviaires avancées. • Meilleure continuité territoriale entre les wilayas de Tindouf, Béchar et, à terme, l'Oranie.

XIII.7 Conclusion :

L'évaluation environnementale du projet ferroviaire Béchar– Tindouf – Gara Djebilet a permis une lecture rigoureuse des enjeux écologiques liés à sa réalisation. En intégrant dès l'amont les contraintes du milieu naturel et humain, l'étude a permis d'anticiper les effets négatifs potentiels et de structurer un dispositif d'atténuation adapté. L'approche adoptée vise une insertion harmonieuse de l'infrastructure dans son territoire, en veillant à la préservation des équilibres environnementaux tout au long des phases de construction et d'exploitation.

CHAPITRE XII
ANALYSE DES RISQUES

CHAPITRE XIV. ANALYSE DES RISQUES :

XIV.1.1 Introduction :

Notre tracé qui fait partie de la ligne ferroviaire Béchar – Tindouf traverse un environnement saharien caractérisé par des conditions climatiques extrêmes, une géologie sableuse instable et une absence quasi totale de végétation. L'analyse des risques est essentielle pour anticiper les perturbations potentielles, assurer la sécurité des circulations, et garantir la pérennité de l'infrastructure ferroviaire. Ce chapitre identifie les principaux risques techniques et environnementaux auxquels cette ligne peut être exposée et propose des solutions adaptées.

XIV.2 Les risques :

XIV.2.1 Phénomène d'ensablement :

La région de Tindouf, située au cœur d'une zone désertique, est particulièrement vulnérable aux phénomènes d'ensablement. Les vents dominants, soufflant principalement du nord au sud, transportent des grains de sable qui peuvent facilement s'accumuler sur la plateforme ferroviaire. Ce phénomène est aggravé par l'absence de végétation et la faible densité des sols. En plus du sable éolien, la migration de dunes mobiles dans certaines zones peut obstruer la voie et compromettre l'intégrité de la plateforme.

L'accumulation de sable sur les voies peut entraîner une perte de la capacité portante du ballast, perturber les systèmes de drainage, et provoquer un affaissement localisé de la voie, notamment lors des passages de trains lourds. Le phénomène peut également entraîner un vieillissement prématuré des traverses, en modifiant leur capacité à maintenir les rails en place.

➢ **Solutions proposées :**

- Construction de barrières hybrides (solides à la base, poreuses en haut) en matériaux durables comme les murs en gabions ou les palissades en bois composite, afin de casser la vitesse du vent tout en piégeant les particules de sable à différentes hauteurs.
- Installation de haies et rideaux forestiers composés d'espèces xérophiles (comme le tamaris ou l'acacia saharien), agissant à long terme comme des pièges biologiques au sable.

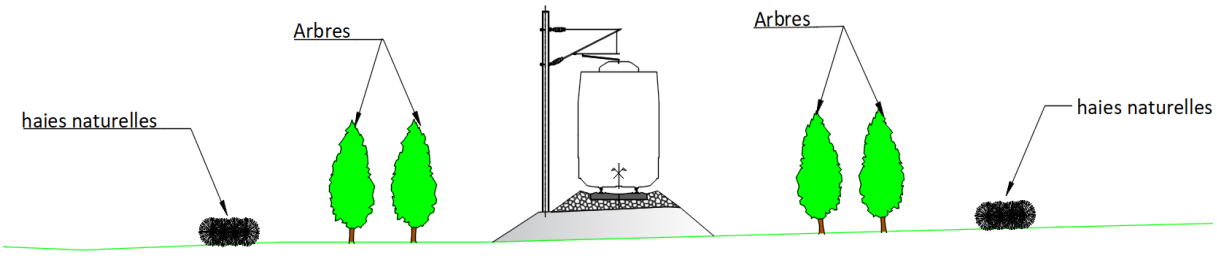


Figure XIV-1 : Disposition protection contre l'ensablement : haies naturelles et rideaux arborés(Autocad).

- Mise en place de filets brise-vent et de murs anti-sable disposés en quinconce pour maximiser la couverture éolienne sur les zones critiques du tracé.



Figure XIV-2 : Disposition protection contre l'ensablement : filets brise-vent et de murs anti-sable.[38]

Pour le cas le plus défavorable dans les zones particulièrement exposées, la surélévation du remblai ferroviaire permet de réduire l'impact direct de l'ensablement sur les voies, facilitant ainsi l'écoulement des eaux de ruissellement et empêchant l'accumulation de sable.

XIV.2.2 Crues soudaines dans les oueds :

La région de Tindouf est traversée par de nombreux oueds, qui sont des lits de rivières temporaires. Ces oueds, souvent secs, peuvent se transformer en torrents lors des épisodes de fortes pluies, entraînant des crues soudaines. La capacité de ces oueds à véhiculer de grandes quantités d'eau, même pendant de courtes périodes, constitue un risque considérable, surtout si les infrastructures de drainage ne sont pas dimensionnées correctement.

Les crues peuvent entraîner des ravinements, des érosions importantes des talus de la voie, et l'endommagement des structures de soutènement (ex: dalots, ponts). Le ruissellement des eaux peut également détériorer la couche de ballast et déstabiliser le fond de la plateforme, provoquant des affaissements ou des ruptures de la voie.

- **Solutions proposées :**

- Conception de dalots en béton armé renforcés, calibrés selon les débits exceptionnels issus des données hydrologiques locales.
- Aménagement de bassins de rétention temporaires et de chenaux de dérivation pour ralentir le débit des crues et détourner l'eau loin de la plateforme.
- Stabilisation des berges par enrochements de type rip-rap ou par des gabions métalliques renforcés pour réduire le cisaillement latéral.

[38] https://media.licdn.com/dms/image/v2/D4D22AQEbRap2mcF6jQ/feedshare-shrink_800/B4DZa9azPjG0Ak-/0/1746934644778?e=2147483647&v=beta&t=qwIgpQ4N_ub55SeBwwVDnZhC-alviSN3pb_tGNNIkIM

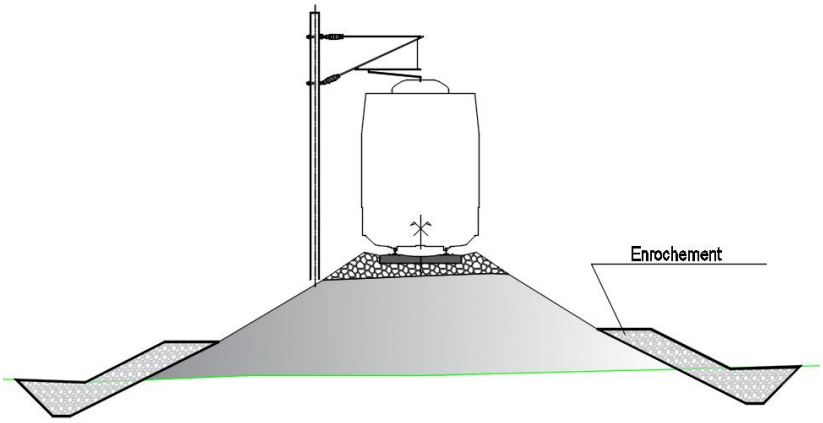


Figure XIV-3 : Stabilisation des berges par enrochements de type rip-rap (Autocad).

XIV.3 Risques techniques liés à la plateforme et à la structure de voie :

XIV.3.1 Dégradation du ballast par infiltration de fines :

On a déjà cité dans les chapitres précédents que le ballast est essentiel pour assurer la stabilité de la voie. Cependant, dans la région de Tindouf, les sols présentent une forte proportion de fines, qui peuvent pénétrer dans le ballast, réduisant ainsi sa capacité de drainage. Cette infiltration peut être exacerbée par les variations de température et l'humidité relative, rendant le ballast dégradé et moins performant.

La présence de fines dans le ballast peut provoquer son colmatage, entravant ainsi l'écoulement de l'eau et augmentant le risque de tassement de la voie. Cela peut entraîner une instabilité générale, un affaissement de la voie, une déformation et une mauvaise répartition des charges sous les traverses.

➢ **Solutions proposées :**

- Utilisation de matériaux filtrants géotextiles sous le ballast, de type non-tissé aiguilleté haute perméabilité, pour séparer les couches tout en assurant le drainage.
- Renouvellement périodique du ballast avec nettoyage mécanisé par cribleuses intégrées à une rame de maintenance lourde.
- Traitement superficiel du ballast par liants stabilisateurs comme le chlorure de calcium ou le lignosulfonate, réduisant la perméabilité à l'air et piégeant les particules fines (Technique encore peu utilisée et non maîtrisée localement ; reste a expérimenter).
- Intégration de traverses à base de composites polymères ou de caoutchouc recyclé, plus résistantes à l'abrasion par sable et aux vibrations.

XIV.3.2 Effet thermique et dilatation des rails :

Les rails sont soumis à de fortes variations de température, particulièrement dans les régions désertiques où les écarts thermiques entre le jour et la nuit peuvent être considérables. Cette dilatation thermique peut entraîner des tensions internes dans les rails, affectant leur alignement et leur stabilité.

Les effets thermiques peuvent provoquer des ruptures ou des déformations des rails, entraînant des déplacements latéraux, des flambages de voie et des risques de déraillement. Les variations thermiques sont accentuées par l'ensoleillement direct et la chaleur accumulée sur les traverses métalliques, affectant la géométrie de la voie.

➢ **Solutions proposées :**

- Des joints de dilatation, situés à intervalles réguliers sur les sections longues de rails, permettent de compenser les variations de longueur dues à la chaleur.

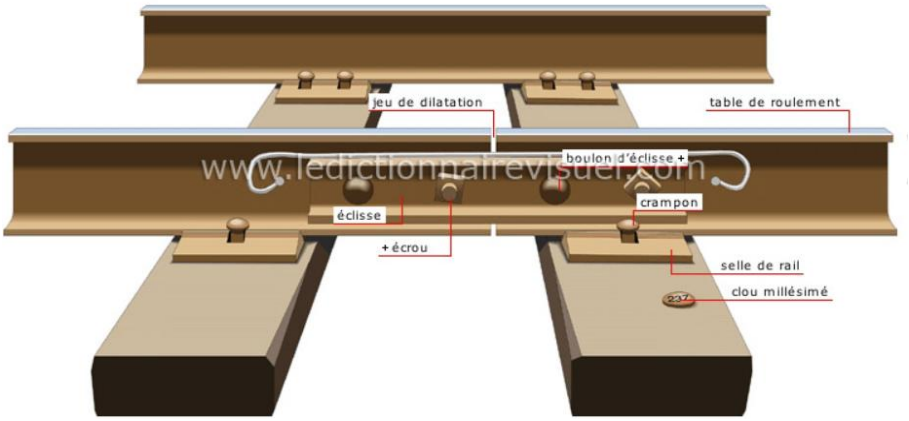


Figure XIV-4 : Joint de dilatation pour la compensation thermique des rails.[39]

- La pose des rails doit se faire en tenant compte des conditions thermiques, de préférence à une température moyenne pour éviter les tensions excessives.
- Choix d'aciers alliés haute résistance pour rails (UIC 60 E1 R260 ou R350HT) avec traitement thermique pour augmenter leur durée de vie.
- Utilisation de systèmes de lubrification active (graisseurs de voie automatisés) pour limiter le frottement sur les courbes et sections critiques.

XIV.4 Conclusion :

L'analyse des risques liée à la région de Tindouf et à la conception du tracé ferroviaire de la ligne Béchar – Tindouf met en lumière plusieurs défis techniques et environnementaux, allant des phénomènes d'ensablement aux risques d'érosion dans les oueds, sans oublier les particularités géotechniques des sols locaux. L'intégration de solutions techniques adaptées à ces risques, combinées à un suivi régulier et à une maintenance proactive, garantit la stabilité et la sécurité à long terme de cette infrastructure essentielle pour le développement économique de la région.

[39] https://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/images/qc/joint-de-rail-118380.jpg

CHAPITRE XV

PLANIFICATION DU PROJET

CHAPITRE XV. PLANIFICATION DU PROJET :

XV.1 Introduction :

La planification d'un projet est une démarche stratégique qui permet de maîtriser les délais, les ressources et la coordination des différentes étapes. Dans le cadre de notre projet d'étude, un planning prévisionnel a été établi à l'aide du logiciel Primavera P6, en se basant sur les grandes phases de travaux attendues.

XV.2 Importance de la planification dans les projets d'infrastructure :

La planification dans les projets d'infrastructure structure les priorités, optimise les coûts, anticipe les aléas et garantit la continuité entre les différentes phases.

- Organisation rationnelle de la séquence des travaux.
- Définition précise des délais et des liens d'interdépendance pour éviter tout retard.
- Outil essentiel pour le pilotage opérationnel et la gestion du chantier.
- Référence stable pour la coordination entre maîtres d'œuvre, sous-traitants et fournisseurs.

XV.3 Planification avec Primavera P6 :

XV.3.1 Démarche adoptée :

Le planning de notre projet d'étude a été structuré autour de cinq opérations principales, chacune représentée par des activités détaillées, avec des durées estimées, des relations de dépendance, et des jalons de suivi.

XV.3.2 Phases principales planifiées :

1. **Installation générale de chantier** (416jours) : Mise en place des bases-vie, aménagement des accès, organisation logistique initiale et replie de matériels.
2. **Études d'exécution** (60 jours) : Comprend les études d'exécutions ; géométriques, géotechniques, hydrauliques, et techniques avant démarrage des travaux.
3. **Terrassement généraux** (239 jours) : Décapage des terres végétale, remblai, déblai, nivellement du terrain, pose de la plateforme.
4. **Drainage et assainissement** (231 jours) Pose de buses, fossés, cunettes, systèmes d'évacuation des eaux pluviales.
5. **Travaux de voie** (321 jours) :
    - **Approvisionnement des matériaux :** rails, traverses, ballast.
    - **Pose de la voie :** installation des traverses, mise en place du ballast, réglage, soudure, bourrage.
6. **Gare et bâtiment des voyageurs** (146 jours).

Durée totale estimée du projet : environ 416 jours.

Le planning de l'installation générale de chantier a été établi en intégrant, en fin de période, les opérations de repli du matériel, des équipements et des installations provisoires, conformément aux exigences de remise en état du site prévues à la clôture du projet.

XV.4 Diagramme Gantt et chemin critique :

Le planning sous Primavera P6 a permis d'identifier le chemin critique, essentiel pour garantir le respect des délais. Des captures d'écran du planning Gantt seront intégrées en format A3 pour illustrer visuellement la séquence et la durée de chaque activité.

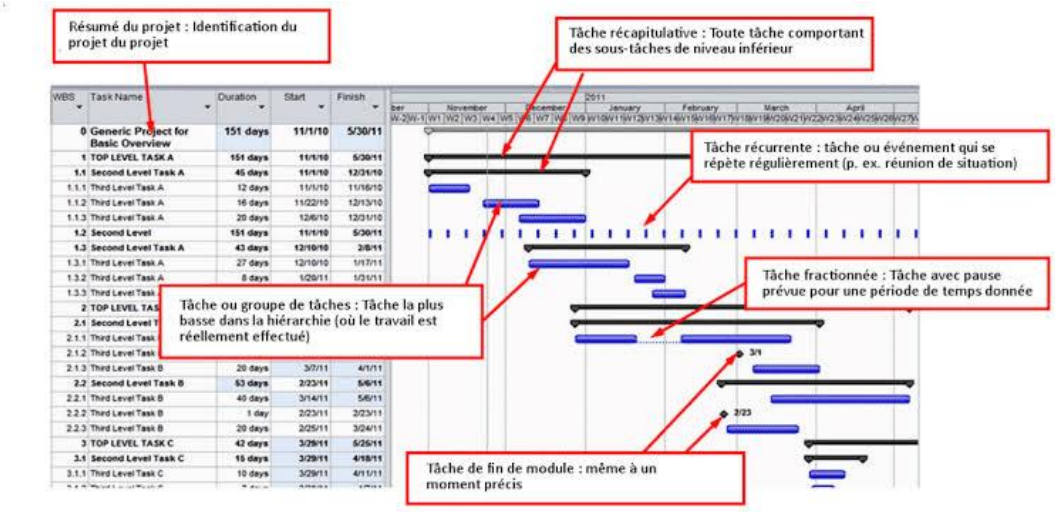


Figure XV-1 : Représentation du diagramme de Gantt.[40]

XV.5 Conclusion :

L'élaboration d'un planning structuré sous **Primavera P6** reflète une approche rigoureuse et moderne de la gestion de projet. Cet outil a permis d'optimiser la maîtrise des délais, de clarifier les enchaînements d'activités, de prévenir les conflits de coordination, et de corriger les écarts entre la planification théorique et les réalités du terrain. Cette anticipation a contribué à limiter les risques de retards et les erreurs techniques coûteuses, tout en renforçant l'efficacité globale du pilotage du chantier.

[40] https://www.leblogdudirigeant.com/organiser-son-projet-avec-le-diagramme-de-gantt/

Étude en APD de la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique Béchar-Tindouf-Gara Djebilet du PK 618 000 au PK 639 000 avec la conception de la gare d'Oum El Assel

#	Nom de l'activité	Uni	Quantité	Durée initiale
1	**PFE PROJET Béchar-Tindouf PK 618+000 au P**		37409.00	416
2	Ordre de service			0
3	**INSTALLATION GENERALE DE CHANTIER**		3.00	416
4	Installation générale de chantier	F	1.00	28
5	Fourniture et installation d'un laboratoire de chantier	F	1.00	18
6	Repli du matériel et des installation de labo du chantie	F	1.00	15
7	**ÉTUDES D'EXÉCUTION**		4.00	60
8	étude d'exécution des terrassement	F	1.00	60
9	étude d'éxécution de la voie	F	1.00	60
10	étude d'exécution de drainage et assainissement	F	1.00	60
11	étude d'exécution de la gare et du bâtiment voyageur		1.00	60
12	**TERRASSEMENTS GENERAUX**		220823.0	239
13	Décapage des terres végétale sur épaisseur de 0.3m	m3	36986.0	36
14	Déblai meuble mis en dépot	m3	62536.0	42
15	Remblais d'apport	m3	76925.0	187
16	Fourniture et mise en oeuvre de la couche de forme	m3	37496.0	44
17	Fourniture et mise en oeuvre de la couche de fondation	m3	72064.0	48
18	Fourniture et mise en oeuvre de la couche de sous Ballast	m3	34816.0	41
19	**DRAINAGE ET ASSAINISSEMENTS**		17474.0	231
20	fourniture et pose de buse en béton armé	ml	226.00	59
21	fourniture et pose de dalots en BA (3*2)	m3	2248.00	68
22	Mise en oeuvre de fossé en BA longitudinalement	ml	15000.0	58
23	**TRAVAUX DE VOIE**		49004.0	321
24	Fourniture des Rails Neufs UIC 60	T	3420.00	31
25	Fourniture des traverse monobloc	U	51300.0	35
26	Fourniture des Attaches	U	105200.0	32
27	Fourniture de Ballast	m3	50069.0	32
28	Fourniture des ADV simples UIC 60- 500 1/12	U	2.00	40
29	Fourniture des ADV simples UIC 60 -500 1/9	U	6.00	40
30	Distribution des Rails UIC 60	ml	3420.00	40
31	Soudage électrique ou alluminothérmique des barres de 18 m	U	3206.00	22
32	Distribution des Traverses	ml	51300.0	30
33	Montage des Rails sur les traverses (fixation ou Pose de voi	ml	30780.0	44
34	Soudage aluminothermique des joints des LRS	U	214.00	30
35	Ballastage de la voie	m3	50069.0	41
36	Pose des ADV simples UIC 60- 500 1/12	U	2.00	10
37	Pose des ADV simples UIC 60 -500 1/9	U	6.00	30
38	Pose des traverses de Garage Franc	U	8.00	15
39	Heurtoire	U	2.00	11
40	**GARE ET BÂTIMENTS VOYAGEURS**		101.00	146
41	Réalisation des travaux d'aménagement éxtérieur de la gare	F	1.00	141
42	Réalisation du batiment voyageur de la gare	m3	100.00	101



Actual Level of Effort — summary
Actual Work
Remaining Work
Critical Remaining Work
Milestone

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

BRAIK RAOUNEK & BOUCHIREB KHAWLA
Encadré PAR : M.BENINAL Abd elaziz

CHAPITRE XVI

DEVIS ESTIMATIF ET QUANTITATIF

CHAPITRE XVI. DEVIS ESTIMATIF ET QUANTITATIF

Tableau XVI-1 : Devis estimatif et quantitatif.

N°	Désignations	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant HT
1- ÉTUDE D'EXÉCUTION ET INSTALLATION DE CHANTIER :					
1-1	Amenée du matériel et installation général du chantier	F	1	1 837 074 913	1 837 074 913,00
1-2	Repli du matériel	F	1	410 330 840	410 330 840,00
1-3	Fourniture et installation de laboratoire de chantier	F	1	574 463 176	574 463 176,00
1-4	Repliement de laboratoire de chantier	F	1	246 198 504	246 198 504,00
				PRIX TOTAL :	**3 068 067 432,00**
2- ÉTUDE D'EXÉCUTION					
2-1	Étude d'exécution	F	1	1 113 111 863,20	1 113 111 863,20
				PRIX TOTAL :	**1 113 111 863,20**
3- TERRASSEMENTS					
3-1	Décapage de terre végétale sur épaisseur de 0.3 m	M3	136 985,76	685,10	93 849 108,60
3-2	Déblais mise en dépôt	M3	162 536	1 950,00	316 945 200,00
3-3	Remblais d'apport	M3	776 925	1 430,00	1 111 002 750,00
3-4	Fourniture et mise en œuvre de Couche de fondation	M3	37 496	4 387,50	164 513 700,00
3-5	Fourniture et mise en œuvre de Couche de forme	M3	72 064	1 820,00	131 156 480,00
3-6	Fourniture et mise en œuvre de sous ballast	M3	34 816	4 387,50	152 755 200,00
				PRIX TOTAL :	**1 970 222 439,00**
4- DRAINAGE ET ASSAINISSEMENT					
4-1	Fossés trapézoïdaux en béton armé	ML	15 000	9 000,00	135 000 000,00
4-2	Dalot en béton armé (3×2)	M3	2 248	100 000,00	224 732 000,00
4-3	Buses en béton arme diamètre (1500)	ML	226	139 647,38	31 459 761,77
				PRIX TOTAL :	391 191 761,8
5- TRAVAUX DE VOIE ET DE GARE					
5-1	Ballastage voie	M3	50 069	8 679,83	434 590 408,30
5-2	Fourniture des traverses mono-bloc	U	51 300	12 000,00	615 600 000,00
5-3	Fourniture des rails NEUFS UIC 60 (60,21 kg/m)	T	3 420	17 250,00	58 995 000,00
5-4	Fourniture des attachés pour le rail UIC60	U	205 200	1 610,00	330 372 000,00
5-5	Fourniture semelle cannelée (200x165x9)	U	102 600	345,00	35 397 000,00
5-6	Pose de voie	ML	30 780	8 050,00	247 779 000,00
5-7	Fourniture des appareils de voie simples UIC 60 - 500-1/12 et Pose des appareils de voie simple UIC 60 -500 1/12	U	2	29 900 000,00	59 800 000,00
5-8	Fourniture des appareils de voie simples UIC 60 - 300-1/9 et Pose des appareils de voie simple UIC 60 -300-1/9	U	6	25 300 000,00	151 800 000,00
5-9	Soudage aluminothermique	U	214	25 818,71	5 525 203,94
5-11	Soudage électrique	U	3 206	25 818,71	82 774 784,26

5-12	Traverses de Garage franc	U	8	68 202,42	545 619,36
5-14	Fourniture et pose Heurtoir	U	2	475 000,00	950 000,00
PRIX TOTAL :					2024129016,00
6- SIGNIALISATION ET ELECTRIFICATION					
6-1	Electrification 25 kV/50 Hz	U	1	500 000 000,00	500 000 000,00
PRIX TOTAL :					500 000 000,00
7- OUVRAGE D'ART					
7-1	Passage supérieure	U	1	539 537 489,65	539 537 489,65
PRIX TOTAL :					539 537 489,65
8- BATIMENTS GARES ET AMENAGEMENT EXTERIEUR					
8-1	Aménagement et toutes les installations de la gare (bâtiment parking, quai, abris de quai……..)	U	-	-	3 251 560,00
PRIX TOTAL :					**3 251 560,00**
MONTANT TOTALE DU PROJET EM (HT)				**9 609 511 561,00**	
Montant de la T.V. A				**1 825 807 197,00**	
MONTANT TOTAL FINAL EN TTC				**11 435 318 758,00**	

Montant total en TTC (en lettres) :

Onze milliards quatre cent trente-cinq millions trois cent dix-huit mille sept cent cinquante-huit dinars algériens.

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Le présent mémoire de fin d'études porte sur l'Avant-Projet Détaillé (APD) d'un tronçon de la future ligne ferroviaire minière reliant Béchar à Gara Djebilet, via Tindouf. Le segment étudié s'étend du PK 618+000 au PK 639+000, incluant la conception de la gare d'Oum El Assel jusqu'au PK 642+100. Ce projet s'inscrit dans le cadre de la stratégie nationale visant à développer les infrastructures ferroviaires en appui à l'exploitation du gisement de fer de Gara Djebilet,

Ce corridor ferroviaire représente un maillon stratégique du futur réseau logistique minier, indispensable au transport massif du minerai vers le port d'Arzew. L'objectif est d'assurer un acheminement fiable, compétitif et durable, répondant aux exigences du transport lourd sur longues distances.

L'étude menée couvre plusieurs volets techniques fondamentaux. Une analyse géométrique rigoureuse a permis d'optimiser le tracé en fonction des contraintes topographiques du terrain. Des investigations géologiques et géotechniques ont été réalisées pour caractériser la nature des sols. Parallèlement, des études hydrauliques et hydrologique ont été conduites pour concevoir les ouvrages de franchissement et les dispositifs de drainage nécessaires à la gestion des eaux de surface et souterraines.

La conception et la modélisation du projet ont été assurées à l'aide de divers logiciels professionnels : AutoCAD, Civil 3D, InfraWorks, SketchUp, Geo5, Primavera P6, Google Earth Pro, Twinmotion et ArcGIS. Ces outils ont permis de produire des plans précis, des visualisations réalistes et des simulations fiables, facilitant la prise de décision technique et la coordination avec les différentes parties prenantes.

L'ensemble de l'étude a été conduit dans le respect des prescriptions techniques de l'UIC (Union Internationale des Chemins de fer) et des normes en vigueur de la SNTF (Société Nationale des Transports Ferroviaires), afin de garantir un projet conforme, sécurisé et opérationnel.

Ce projet constitue une étape significative dans notre formation d'ingénieures, en consolidant nos acquis théoriques et en nous confrontant aux réalités d'un projet ferroviaire d'envergure nationale. Il nous prépare à intégrer, avec compétence et responsabilité, les futurs défis du secteur ferroviaire et du développement des grands projets d'infrastructure en Algérie.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] : Groupe d'experts nationaux et internationaux, Règlement Parasismique des Ouvrages d'Art 2024, Alger, ministère des Travaux Publics.

[2] SNTF, Référentiel technique, version 2, chapitre 6 : Géométrie de la voie, 2005.

[3] SNTF, chapitre 10, signalisation et télécommunication, version 2.

[4] SNTF, Référentiel technique, version 02, chapitre 7.2.2 : Ouvrages en terre pour plateformes ferroviaires.

[5] Référentiel RFF/SNCF IN 0274, Mise en œuvre du ballast pour voie ferrée, version 2 du 25/05/2010.

[6] « UIC 719, 3e 3dition », Ouvrages en terre et couches d'assises ferroviaires.

[7] « UIC 719 R», Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaire, 2ème Edition ,2008.

[8] Rapport technique de la sous mission tracé section N 04 BIS « SETS ».

[9] Rapport Hydrologique et Hydraulique APD du Pk200 au Pk640 « SETS ».

[10] Rapport Géologie et géotechnique -PK600-PK640« SETS ».

[11] Sétra, Guide technique : Assainissement routier, Octobre 2006.

[12] Guide des terrassements routiers.

[13] Rapport de la lutte contre l'ensablement « SETIRAIL ».,

[13] " infrastructures DE BASE DE LA WILAYA Tindouf " 01, Juin.2025 https://www.interieur.gov.dz/Monographie/article_detail.php?lien=1492&wilaya=37.

[14] "Tindouf" Wikipedia, 20 mars. 2024.https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_Tindouf.

[15] Cours voie ferrée MORSLI Rabeh. ENSTP.

[16] Cours hydraulique et assainissement de RHMANI Douadi ENSTP.

[17] Mémoires de voie ferrée école nationale des travaux publics.

ANNEXES

Annexe A : Listing Axe

Listing de la géométrie de l'axe en plan.

Client:	**Prepared by:**
Client	Preparer
Client Company	Your Company Name
Address 1	123 Main Street

Date: 04/06/2025 23:23:38

Axe en plan: Axe de projet
Description:
Plage d'abscisse : Début : 618000.00, Fin : 642100.00

Elem	Caractéristiques	Longueur	Abscisse	X	Y
			618000.00	721386.6734	3170972.4745
DR1	ANG=284.9262 (g)	1096.457			
			619096.46	720320.8089	3170715.2757
CLO2	A=479.583				
	R=2300.000	100.000			
			619196.46	720223.4337	3170692.5240
ARC3	XC=719732.6453				
	YC=3172939.5502				
	R=2300.000	112.271			
			619308.73	720113.2078	3170671.2530
CLO4	A=479.583				
	R=2300.000	100.000			
			619408.73	720014.3588	3170656.1381
DR5	ANG=290.8017 (g)	3631.025			
			623039.75	716421.1696	3170133.3248

CLO6	A=565.685				
	R=3200.000	100.000			
			623139.75	716322.1391	3170119.4420
ARC7	XC=715910.9202				
	YC=3173292.9100				
	R=3200.000	905.628			
			624045.38	715419.6024	3170130.8526
CLO8	A=565.685				
	R=3200.000	100.000			
			624145.38	715320.9545	3170147.2346
DR9	ANG=310.8080 (g)	691.327			
			624836.71	714639.5661	3170264.0393
CLO10	A=479.583				
	R=2300.000	100.000			
			624936.71	714540.8860	3170280.2200
ARC11	XC=714201.6537				
	YC=3168005.3746				
	R=2300.000	1375.184			
			626311.89	713201.4942	3170076.5292
CLO12	A=479.583				
	R=2300.000	100.000			
			626411.89	713112.0856	3170031.7444
DR13	ANG=269.9762 (g)	291.782			
			626703.67	712852.1556	3169899.1810
CLO14	A=479.583				

	R=2300.000	100.000			
			626803.67	712762.7469	3169854.3963
ARC15	XC=711762.5875				
	YC=3171925.5508				
	R=2300.000	975.828			
			627779.50	711821.4630	3169626.3045
CLO16	A=479.583				
	R=2300.000	100.000			
			627879.50	711721.4712	3169625.1937
DR17	ANG=299.7542 (g)	1084.308			
			628963.81	710637.1715	3169621.0064
CLO18	A=632.456				
	R=4000.000	100.000			
			629063.81	710537.1754	3169620.2036
ARC19	XC=710602.6193				
	YC=3165620.7390				
	R=4000.000	801.750			
			629865.56	709742.1998	3169527.1028
CLO20	A=632.456				
	R=4000.000	100.000			
			629965.56	709644.7240	3169504.7794
DR21	ANG=285.4024 (g)	3674.468			
			633640.03	706066.4316	3168669.5906
CLO22	A=632.456				
	R=4000.000	100.000			

			633740.03	705968.9558	3168647.2672
ARC23	XC=705108.5362				
	YC=3172553.6310				
	R=4000.000	456.957			
			634196.99	705518.0577	3168574.6497
CLO24	A=632.456				
	R=4000.000	100.000			
			634296.99	705418.5020	3168565.2410
DR25	ANG=294.2666 (g)	3571.756			
			637868.74	701861.2214	3168244.0031
CLO26	A=479.583				
	R=2300.000	100.000			
			637968.74	701761.6965	3168234.2880
ARC27	XC=702018.2993				
	YC=3165948.6470				
	R=2300.000	1236.833			
			639205.57	700627.1900	3167780.2623
CLO28	A=479.583				
	R=2300.000	100.000			
			639305.57	700548.4411	3167718.6328
DR29	ANG=257.2642 (g)	2794.425			
			642100.00	698360.3539	3165980.5065

Annexe B : Listing profil

Profil : Abscisse Sommets et Raccordements

Client:	**Prepared by:**
Client	Preparer
Client Company	Your Company Name
Address 1	123 Main Street

Date: 04/06/2025 23:24:52

Profil en long : Ligne rouge
Description:
Plage d'abscisse : Début: 618000.00, Fin: 642100.00
LONGUEUR DE L'AXE : 24100.000m

Elément	Caractéristiques des éléments	Longueur	Abscisse	Z
			618000.00	545.330
D1	PENTE= -0.18%	609.383		
			618609.38	544.222
ARC1	S= 618651.95 Z=544.145			
	R= -90000.000	85.139		
			618694.52	544.027
D2	PENTE= -0.28%	880.934		
			619575.46	541.592
ARC2	S= 619653.30 Z=541.377			
	R= -50000.000	155.693		
			619731.15	541.404
D3	PENTE= 0.03%	329.015		
			620060.16	541.519
ARC3	S= 620127.94 Z=541.543			
	R= -50000.000	135.545		

			620195.71	541.383
D4	PENTE= -0.24%	1079.900		
			621275.61	538.833
ARC4	S= 621346.91 Z=538.665			
	R= -20000.000	142.611		
			621418.22	539.005
D5	PENTE= 0.48%	1765.577		
			623183.80	547.426
ARC5	S= 623279.29 Z=547.881			
	R= -20000.000	190.989		
			623374.79	547.425
D6	PENTE= -0.48%	1601.915		
			624976.70	539.767
ARC6	S= 625065.16 Z=539.345			
	R= -20000.000	176.921		
			625153.62	539.704
D7	PENTE= 0.41%	1802.169		
			626955.79	547.032
ARC7	S= 627042.33 Z=547.384			
	R= -20000.000	173.071		
			627128.86	546.987
D8	PENTE= -0.46%	1991.707		
			629120.57	537.850
ARC8	S= 629168.77 Z=537.629			
	R= -20000.000	96.408		

			629216.98	537.640
D9	PENTE= 0.02%	3587.133		
			632804.11	538.476
ARC9	S= 632860.05 Z=538.489			
	R= -30000.000	111.889		
			632916.00	538.293
D10	PENTE= -0.35%	1104.385		
			634020.38	534.431
ARC10	S= 634063.33 Z=534.281			
	R= -30000.000	85.894		
			634106.28	534.254
D11	PENTE= -0.06%	4481.930		
			638588.21	531.414
ARC11	S= 638638.40 Z=531.382			
	R= -30000.000	100.392		
			638688.60	531.183
D12	PENTE= -0.40%	665.803		
			639354.40	528.533
ARC12	S= 639404.15 Z=528.335			
	R= -25000.000	99.499		
			639453.90	528.335
D13	PENTE= 0.00%	2646.097		
			642100.00	528.335

Annexe C

Annexe C-1 : délimitation des bassins versant

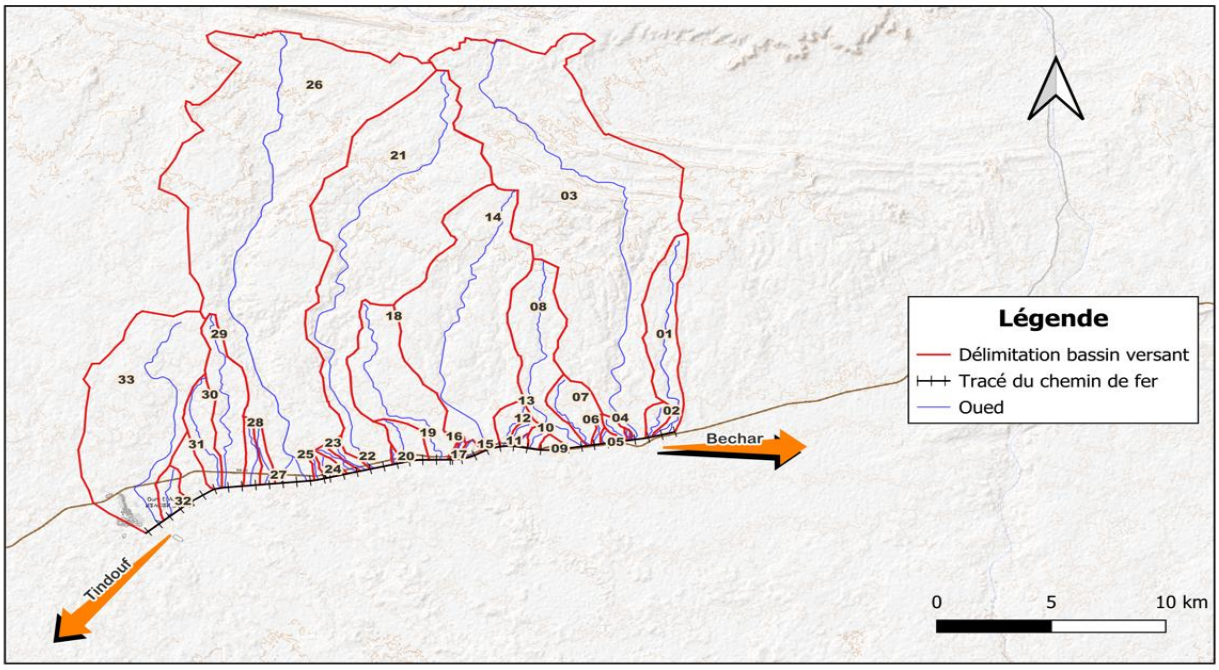


Figure : Délimitation des bassins versants du projet d'étude (ARCGIS).

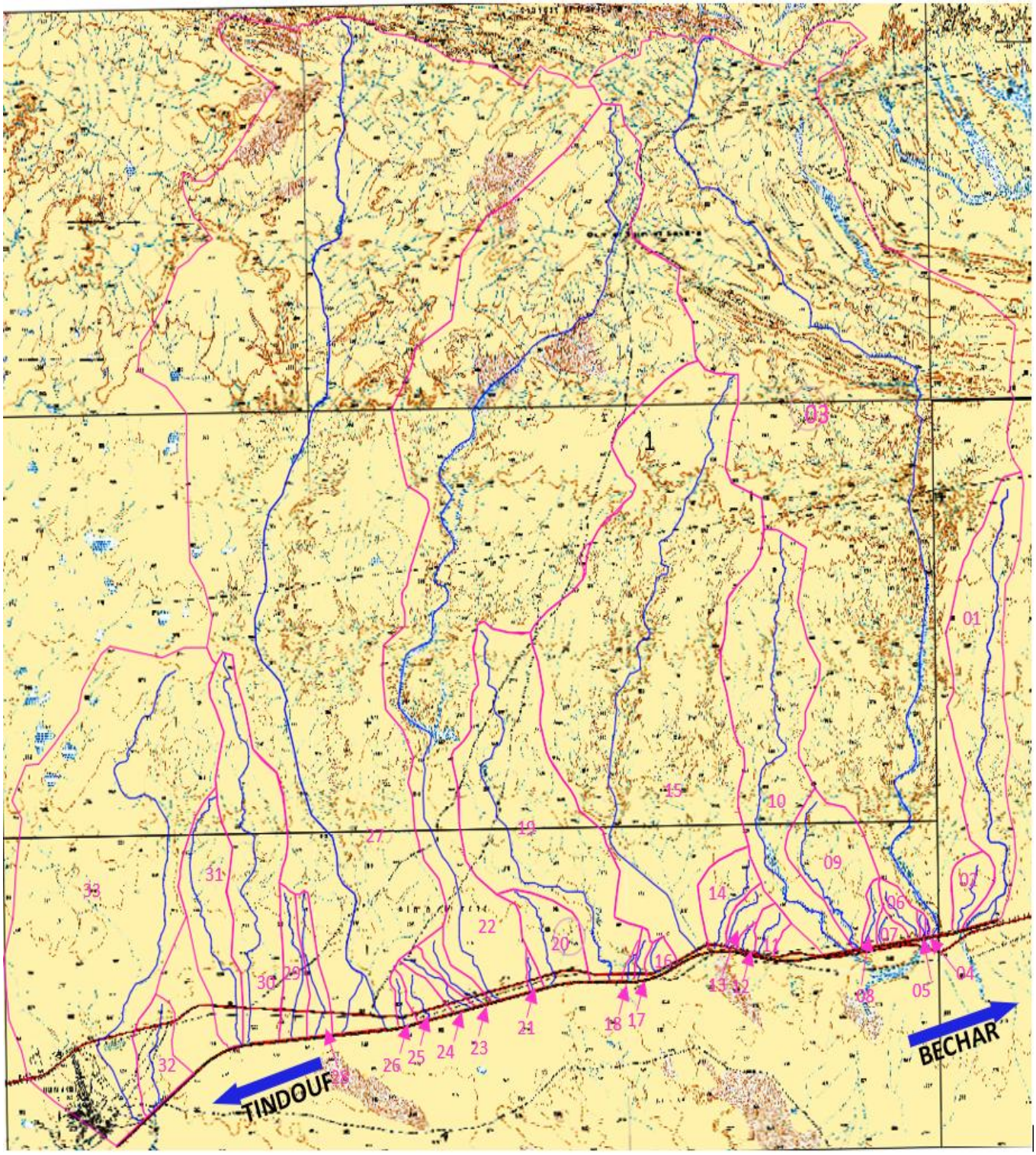


Figure : Délimitation des bassins versants du projet d'étude (Aut CAD).

Annexe C-2 : coefficient de rugosité Ks

$C1$:. dépend de l'inclinaison du cours d'eau majeure				**$C2$: dépend la perméabilité du sol.**				**$C3$: Est tributaire de la végétation du bassin versant.**			
La pente du cours d' eau I%	≤3,5 %	0,01	0,03	**0,05**	**La perméabilité du terrain**	Imperméable	0,22	0,26	0,30	**La couverture végétale du bassin versant**	Rocheux	0,22	0,26	0,30
	Entre 3,5 et 11 %	0,06	0,08	0,10		Peu perméable	0,10	0,15	**0,20**		Prairie	0,17	0,21	0,25
	Entre 11 et 35 %	0,12	0,16	0,20		Perméable	0,06	0,08	0,10		Labours champs	0,07	0,11	0,15
	> à 35 %	0,22	0,26	0,30		Très perméable	0,03	0,04	0,05		Foret e territoire sableux	0,03	0,04	**0,05**

Annexe C-3 : Canalisation circulaire partiellement remplie

Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh
0,0021	0,189	0,033	0,0600	0,548	0,166	0,1179	0,670	0,232	0,1758	0,750	0,283	0,2337	0,814	0,329	0,2916	0,866	0,370
0,0031	0,219	0,040	0,0611	0,551	0,167	0,1190	0,672	0,233	0,1769	0,752	0,284	0,2348	0,815	0,329	0,2927	0,867	0,371
0,0042	0,249	0,048	0,0621	0,554	0,169	0,1200	0,674	0,234	0,1779	0,753	0,285	0,2359	0,816	0,330	0,2938	0,867	0,371
0,0053	0,266	0,053	0,0632	0,557	0,170	0,1211	0,676	0,235	0,1790	0,755	0,286	0,2369	0,817	0,331	0,2948	0,868	0,372
0,0064	0,278	0,057	0,0643	0,560	0,172	0,1222	0,677	0,236	0,1801	0,756	0,287	0,2380	0,818	0,332	0,2959	0,869	0,373
0,0074	0,290	0,061	0,0653	0,563	0,173	0,1233	0,679	0,237	0,1812	0,757	0,288	0,2391	0,819	0,333	0,2970	0,870	0,373
0,0085	0,302	0,065	0,0664	0,566	0,175	0,1243	0,681	0,238	0,1822	0,759	0,289	0,2401	0,820	0,333	0,2981	0,871	0,374
0,0096	0,315	0,069	0,0675	0,569	0,176	0,1254	0,682	0,239	0,1833	0,760	0,290	0,2412	0,821	0,334	0,2991	0,872	0,375
0,0107	0,327	0,073	0,0686	0,571	0,177	0,1265	0,684	0,240	0,1844	0,762	0,290	0,2423	0,822	0,335	0,3002	0,873	0,376
0,0117	0,337	0,076	0,0696	0,574	0,179	0,1275	0,686	0,241	0,1855	0,763	0,291	0,2434	0,823	0,336	0,3013	0,874	0,376
0,0128	0,344	0,079	0,0707	0,576	0,180	0,1286	0,687	0,242	0,1865	0,764	0,292	0,2444	0,824	0,337	0,3023	0,874	0,377
0,0139	0,352	0,082	0,0718	0,579	0,181	0,1297	0,689	0,243	0,1876	0,766	0,293	0,2455	0,825	0,337	0,3034	0,875	0,378
0,0149	0,360	0,085	0,0729	0,582	0,183	0,1308	0,691	0,244	0,1887	0,767	0,294	0,2466	0,826	0,338	0,3045	0,876	0,378
0,0160	0,367	0,088	0,0739	0,584	0,184	0,1318	0,692	0,245	0,1897	0,768	0,295	0,2477	0,828	0,339	0,3056	0,877	0,379
0,0171	0,375	0,090	0,0750	0,587	0,185	0,1329	0,694	0,246	0,1908	0,770	0,296	0,2487	0,829	0,340	0,3066	0,878	0,380
0,0182	0,382	0,093	0,0761	0,589	0,187	0,1340	0,696	0,247	0,1919	0,771	0,297	0,2498	0,830	0,341	0,3077	0,879	0,381
0,0192	0,390	0,096	0,0771	0,592	0,188	0,1351	0,698	0,248	0,1930	0,773	0,298	0,2509	0,831	0,341	0,3088	0,880	0,381
0,0203	0,397	0,099	0,0782	0,594	0,189	0,1361	0,699	0,250	0,1940	0,774	0,299	0,2519	0,832	0,342	0,3099	0,881	0,382
0,0214	0,404	0,101	0,0793	0,597	0,190	0,1372	0,701	0,251	0,1951	0,775	0,300	0,2530	0,833	0,343	0,3109	0,881	0,383
0,0224	0,409	0,103	0,0804	0,599	0,192	0,1383	0,702	0,251	0,1962	0,777	0,300	0,2541	0,834	0,344	0,3120	0,882	0,384
0,0235	0,415	0,105	0,0814	0,602	0,193	0,1393	0,704	0,252	0,1972	0,778	0,301	0,2552	0,835	0,345	0,3131	0,883	0,384
0,0246	0,420	0,108	0,0825	0,604	0,194	0,1404	0,705	0,253	0,1983	0,779	0,302	0,2562	0,836	0,345	0,3141	0,884	0,385

0,0257	0,425	0,110	0,0836	0,607	0,196	0,1415	0,706	0,254	0,1994	0,780	0,303	0,2573	0,837	0,346	0,3152	0,885	0,386
0,0267	0,431	0,112	0,0846	0,609	0,197	0,1426	0,708	0,255	0,2005	0,781	0,304	0,2584	0,838	0,347	0,3163	0,886	0,386
0,0278	0,436	0,114	0,0857	0,612	0,198	0,1436	0,709	0,256	0,2015	0,782	0,304	0,2594	0,839	0,348	0,3174	0,887	0,387
0,0289	0,441	0,116	0,0868	0,615	0,200	0,1447	0,710	0,257	0,2026	0,783	0,305	0,2605	0,840	0,349	0,3184	0,887	0,388
0,0300	0,447	0,118	0,0879	0,617	0,201	0,1458	0,712	0,258	0,2037	0,784	0,306	0,2616	0,841	0,349	0,3195	0,888	0,389
0,0310	0,452	0,120	0,0889	0,619	0,202	0,1468	0,713	0,259	0,2048	0,785	0,307	0,2627	0,842	0,350	0,3206	0,889	0,389
0,0321	0,457	0,122	0,0900	0,621	0,203	0,1479	0,715	0,260	0,2058	0,786	0,308	0,2637	0,843	0,351	0,3216	0,890	0,390
0,0332	0,463	0,125	0,0911	0,623	0,204	0,1490	0,716	0,261	0,2069	0,787	0,308	0,2648	0,844	0,352	0,3227	0,891	0,391
0,0342	0,467	0,126	0,0922	0,625	0,205	0,1501	0,717	0,261	0,2080	0,788	0,309	0,2659	0,845	0,352	0,3238	0,892	0,391
0,0353	0,471	0,128	0,0932	0,627	0,206	0,1511	0,719	0,262	0,2090	0,789	0,310	0,2670	0,846	0,353	0,3249	0,893	0,392
0,0364	0,474	0,130	0,0943	0,629	0,208	0,1522	0,720	0,263	0,2101	0,790	0,311	0,2680	0,847	0,354	0,3259	0,894	0,393
0,0375	0,478	0,132	0,0954	0,631	0,209	0,1533	0,721	0,264	0,2112	0,791	0,312	0,2691	0,848	0,355	0,3270	0,894	0,394
0,0385	0,481	0,133	0,0964	0,632	0,210	0,1544	0,723	0,265	0,2123	0,792	0,312	0,2702	0,848	0,355	0,3281	0,895	0,394
0,0396	0,485	0,135	0,0975	0,634	0,211	0,1554	0,724	0,266	0,2133	0,794	0,313	0,2712	0,849	0,356	0,3292	0,896	0,395
0,0407	0,489	0,137	0,0986	0,636	0,212	0,1565	0,726	0,267	0,2144	0,795	0,314	0,2723	0,850	0,357	0,3302	0,897	0,396
0,0418	0,492	0,139	0,0997	0,638	0,213	0,1576	0,727	0,268	0,2155	0,796	0,315	0,2734	0,851	0,357	0,3313	0,898	0,397
0,0428	0,496	0,140	0,1007	0,640	0,214	0,1586	0,728	0,269	0,2166	0,797	0,316	0,2745	0,852	0,358	0,3324	0,899	0,397
0,0439	0,500	0,142	0,1018	0,642	0,215	0,1597	0,730	0,270	0,2176	0,798	0,317	0,2755	0,853	0,359	0,3334	0,900	0,398
0,0450	0,503	0,144	0,1029	0,644	0,216	0,1608	0,731	0,270	0,2187	0,799	0,317	0,2766	0,854	0,360	0,3345	0,900	0,399
0,0460	0,507	0,146	0,1040	0,646	0,217	0,1619	0,733	0,271	0,2198	0,800	0,318	0,2777	0,854	0,360	0,3356	0,901	0,399
0,0471	0,511	0,147	0,1050	0,648	0,219	0,1629	0,734	0,272	0,2208	0,801	0,319	0,2788	0,855	0,361	0,3367	0,902	0,400
0,0482	0,514	0,149	0,1061	0,650	0,220	0,1640	0,735	0,273	0,2219	0,802	0,320	0,2798	0,856	0,362	0,3377	0,903	0,401
0,0493	0,518	0,151	0,1072	0,652	0,221	0,1651	0,737	0,274	0,2230	0,803	0,321	0,2809	0,857	0,363	0,3388	0,904	0,401
0,0503	0,521	0,152	0,1082	0,654	0,222	0,1661	0,738	0,275	0,2241	0,804	0,321	0,2820	0,858	0,363	0,3399	0,904	0,402
0,0514	0,524	0,154	0,1093	0,656	0,223	0,1672	0,739	0,276	0,2251	0,805	0,322	0,2830	0,859	0,364	0,3410	0,905	0,403
0,0525	0,527	0,155	0,1104	0,658	0,224	0,1683	0,741	0,277	0,2262	0,806	0,323	0,2841	0,860	0,365	0,3420	0,906	0,403
0,0535	0,530	0,157	0,1115	0,660	0,225	0,1694	0,742	0,278	0,2273	0,807	0,324	0,2852	0,861	0,365	0,3431	0,906	0,404
0,0546	0,533	0,158	0,1125	0,662	0,226	0,1704	0,744	0,279	0,2283	0,808	0,325	0,2863	0,861	0,366	0,3442	0,907	0,405
0,0557	0,536	0,160	0,1136	0,664	0,227	0,1715	0,745	0,280	0,2294	0,809	0,325	0,2873	0,862	0,367	0,3452	0,908	0,405
0,0568	0,539	0,161	0,1147	0,665	0,228	0,1726	0,746	0,280	0,2305	0,811	0,326	0,2884	0,863	0,368	0,3463	0,909	0,406
0,0578	0,542	0,163	0,1157	0,667	0,229	0,1737	0,748	0,281	0,2316	0,812	0,327	0,2895	0,864	0,368	0,3474	0,909	0,407
0,0589	0,545	0,164	0,1168	0,669	0,230	0,1747	0,749	0,282	0,2326	0,813	0,328	0,2905	0,865	0,369	0,3485	0,910	0,407
0,3495	0,911	0,408	0,4074	0,949	0,444	0,4653	0,981	0,479	0,5233	1,010	0,514	0,5812	1,036	0,548	0,6391	1,059	0,581
0,3506	0,911	0,409	0,4085	0,949	0,445	0,4664	0,982	0,480	0,5243	1,011	0,514	0,5822	1,037	0,548	0,6402	1,059	0,582
0,3517	0,912	0,409	0,4096	0,950	0,445	0,4675	0,982	0,481	0,5254	1,011	0,515	0,5833	1,037	0,549	0,6412	1,059	0,583
0,3527	0,913	0,410	0,4107	0,951	0,446	0,4686	0,983	0,481	0,5265	1,012	0,516	0,5844	1,038	0,549	0,6423	1,060	0,583
0,3538	0,913	0,411	0,4117	0,952	0,447	0,4696	0,984	0,482	0,5275	1,012	0,516	0,5855	1,038	0,550	0,6434	1,060	0,584
0,3549	0,914	0,411	0,4128	0,952	0,447	0,4707	0,984	0,482	0,5286	1,013	0,517	0,5865	1,038	0,551	0,6444	1,061	0,584
0,3560	0,915	0,412	0,4139	0,953	0,448	0,4718	0,985	0,483	0,5297	1,013	0,518	0,5876	1,039	0,551	0,6455	1,061	0,585
0,3570	0,916	0,413	0,4149	0,954	0,449	0,4729	0,985	0,484	0,5308	1,014	0,518	0,5887	1,039	0,552	0,6466	1,062	0,586
0,3581	0,916	0,413	0,4160	0,954	0,449	0,4739	0,986	0,484	0,5318	1,014	0,519	0,5897	1,040	0,553	0,6477	1,062	0,586
0,3592	0,917	0,414	0,4171	0,955	0,450	0,4750	0,987	0,485	0,5329	1,015	0,519	0,5908	1,040	0,553	0,6487	1,062	0,587
0,3603	0,918	0,415	0,4182	0,956	0,451	0,4761	0,987	0,486	0,5340	1,015	0,520	0,5919	1,041	0,554	0,6498	1,063	0,588
0,3613	0,918	0,415	0,4192	0,956	0,451	0,4771	0,988	0,486	0,5351	1,016	0,521	0,5930	1,041	0,554	0,6509	1,063	0,588
0,3624	0,919	0,416	0,4203	0,957	0,452	0,4782	0,988	0,487	0,5361	1,016	0,521	0,5940	1,041	0,555	0,6519	1,064	0,589
0,3635	0,920	0,417	0,4214	0,957	0,453	0,4793	0,989	0,488	0,5372	1,017	0,522	0,5951	1,042	0,556	0,6530	1,064	0,589
0,3645	0,921	0,417	0,4225	0,958	0,453	0,4804	0,989	0,488	0,5383	1,017	0,523	0,5962	1,042	0,556	0,6541	1,064	0,590
0,3656	0,921	0,418	0,4235	0,959	0,454	0,4814	0,990	0,489	0,5393	1,018	0,523	0,5973	1,043	0,557	0,6552	1,065	0,591
0,3667	0,922	0,419	0,4246	0,959	0,455	0,4825	0,991	0,490	0,5404	1,018	0,524	0,5983	1,043	0,558	0,6562	1,065	0,591
0,3678	0,923	0,419	0,4257	0,960	0,455	0,4836	0,991	0,490	0,5415	1,019	0,524	0,5994	1,043	0,558	0,6573	1,066	0,592
0,3688	0,923	0,420	0,4267	0,960	0,456	0,4847	0,992	0,491	0,5426	1,019	0,525	0,6005	1,044	0,559	0,6584	1,066	0,592

0,3699	0,924	0,421	0,4278	0,961	0,457	0,4857	0,992	0,492	0,5436	1,020	0,526	0,6015	1,044	0,559	0,6595	1,066	0,593
0,3710	0,925	0,421	0,4289	0,962	0,457	0,4868	0,993	0,492	0,5447	1,020	0,526	0,6026	1,045	0,560	0,6605	1,067	0,594
0,3721	0,925	0,422	0,4300	0,962	0,458	0,4879	0,994	0,493	0,5458	1,020	0,527	0,6037	1,045	0,561	0,6616	1,067	0,594
0,3731	0,926	0,423	0,4310	0,963	0,459	0,4889	0,994	0,494	0,5469	1,021	0,528	0,6048	1,045	0,561	0,6627	1,068	0,595
0,3742	0,927	0,423	0,4321	0,963	0,459	0,4900	0,995	0,494	0,5479	1,021	0,528	0,6058	1,046	0,562	0,6637	1,068	0,596
0,3753	0,928	0,424	0,4332	0,964	0,460	0,4911	0,995	0,495	0,5490	1,022	0,529	0,6069	1,046	0,563	0,6648	1,069	0,596
0,3763	0,928	0,425	0,4342	0,964	0,460	0,4922	0,996	0,495	0,5501	1,022	0,529	0,6080	1,047	0,563	0,6659	1,069	0,597
0,3774	0,929	0,425	0,4353	0,965	0,461	0,4932	0,996	0,496	0,5511	1,023	0,530	0,6091	1,047	0,564	0,6670	1,069	0,597
0,3785	0,930	0,426	0,4364	0,966	0,462	0,4943	0,997	0,497	0,5522	1,023	0,531	0,6101	1,048	0,564	0,6680	1,070	0,598
0,3796	0,930	0,427	0,4375	0,966	0,462	0,4954	0,998	0,497	0,5533	1,024	0,531	0,6112	1,048	0,565	0,6691	1,070	0,599
0,3806	0,931	0,427	0,4385	0,967	0,463	0,4964	0,998	0,498	0,5544	1,024	0,532	0,6123	1,048	0,566	0,6702	1,071	0,599
0,3817	0,932	0,428	0,4396	0,967	0,464	0,4975	0,999	0,499	0,5554	1,025	0,533	0,6133	1,049	0,566	0,6713	1,071	0,600
0,3828	0,933	0,429	0,4407	0,968	0,464	0,4986	0,999	0,499	0,5565	1,025	0,533	0,6144	1,049	0,567	0,6723	1,071	0,601
0,3838	0,933	0,429	0,4418	0,969	0,465	0,4997	1,000	0,500	0,5576	1,026	0,534	0,6155	1,050	0,568	0,6734	1,072	0,601
0,3849	0,934	0,430	0,4428	0,969	0,466	0,5007	1,000	0,501	0,5586	1,026	0,534	0,6166	1,050	0,568	0,6745	1,072	0,602
0,3860	0,935	0,431	0,4439	0,970	0,466	0,5018	1,001	0,501	0,5597	1,027	0,535	0,6176	1,050	0,569	0,6755	1,072	0,603
0,3871	0,935	0,431	0,4450	0,970	0,467	0,5029	1,001	0,502	0,5608	1,027	0,536	0,6187	1,051	0,569	0,6766	1,073	0,603
0,3881	0,936	0,432	0,4460	0,971	0,468	0,5040	1,002	0,502	0,5619	1,028	0,536	0,6198	1,051	0,570	0,6777	1,073	0,604
0,3892	0,937	0,433	0,4471	0,971	0,468	0,5050	1,002	0,503	0,5629	1,028	0,537	0,6208	1,052	0,571	0,6788	1,073	0,604
0,3903	0,937	0,433	0,4482	0,972	0,469	0,5061	1,003	0,504	0,5640	1,029	0,538	0,6219	1,052	0,571	0,6798	1,074	0,605
0,3914	0,938	0,434	0,4493	0,973	0,470	0,5072	1,003	0,504	0,5651	1,029	0,538	0,6230	1,052	0,572	0,6809	1,074	0,606
0,3924	0,939	0,435	0,4503	0,973	0,470	0,5082	1,004	0,505	0,5662	1,030	0,539	0,6241	1,053	0,573	0,6820	1,075	0,606
0,3935	0,940	0,435	0,4514	0,974	0,471	0,5093	1,004	0,506	0,5672	1,030	0,539	0,6251	1,053	0,573	0,6830	1,075	0,607
0,3946	0,940	0,436	0,4525	0,974	0,471	0,5104	1,005	0,506	0,5683	1,030	0,540	0,6262	1,054	0,574	0,6841	1,075	0,608
0,3956	0,941	0,437	0,4536	0,975	0,472	0,5115	1,005	0,507	0,5694	1,031	0,541	0,6273	1,054	0,574	0,6852	1,076	0,608
0,3967	0,942	0,437	0,4546	0,976	0,473	0,5125	1,006	0,507	0,5704	1,031	0,541	0,6284	1,055	0,575	0,6863	1,076	0,609
0,3978	0,942	0,438	0,4557	0,976	0,473	0,5136	1,006	0,508	0,5715	1,032	0,542	0,6294	1,055	0,576	0,6873	1,076	0,610
0,3989	0,943	0,439	0,4568	0,977	0,474	0,5147	1,007	0,509	0,5726	1,032	0,543	0,6305	1,055	0,576	0,6884	1,077	0,610
0,3999	0,944	0,439	0,4578	0,977	0,475	0,5158	1,007	0,509	0,5737	1,033	0,543	0,6316	1,056	0,577	0,6895	1,077	0,611
0,4010	0,945	0,440	0,4589	0,978	0,475	0,5168	1,008	0,510	0,5747	1,033	0,544	0,6326	1,056	0,578	0,6906	1,077	0,612
0,4021	0,945	0,441	0,4600	0,978	0,476	0,5179	1,008	0,511	0,5758	1,034	0,544	0,6337	1,057	0,578	0,6916	1,078	0,612
0,4032	0,946	0,441	0,4611	0,979	0,477	0,5190	1,009	0,511	0,5769	1,034	0,545	0,6348	1,057	0,579	0,6927	1,078	0,613
0,4042	0,947	0,442	0,4621	0,980	0,477	0,5200	1,009	0,512	0,5780	1,035	0,546	0,6359	1,057	0,579	0,6938	1,079	0,613
0,4053	0,947	0,443	0,4632	0,980	0,478	0,5211	1,010	0,513	0,5790	1,035	0,546	0,6369	1,058	0,580	0,6948	1,079	0,614
0,4064	0,948	0,443	0,4643	0,981	0,479	0,5222	1,010	0,513	0,5801	1,036	0,547	0,6380	1,058	0,581	0,6959	1,079	0,615

Annexe D :

Annexe D-1 : La localisation des sondages et essais in -situ réalisés du P K618+000 au PK642+100.

Essais	Pk	Profondeur (m)
PU-290-LM/TB	PK 619+ 000	4,00
PDL-287-LM/TB	PK 619+ 000	refus
PU-291-LM/TB	PK 620+ 500	4,00
PDL-288-LM/TB	PK 620+ 500	refus
PU-292-LM/TB	PK 622+ 000	4,00
PDL-289-LM/TB	PK 622+ 000	refus
F-59-LM/TB	PK 622+ 735	10,00
PU-293-LM/TB	PK 623+ 500	4,00
PDL-290-LM/TB	PK 623+ 500	refus
PU-294-LM/TB	PK 625+ 000	4,00
PDL-291 LM/TB	PK 625+ 000	refus
PU-295-LM/TB	PK 626+ 500	4,00
PDL-292-LM/TB	PK 626+ 500	refus
F-60-LM/TB	PK 627+ 100	10,00
PU-296-LM/TB	PK 628+ 000	4,00
PDL-293-LM/TB	PK 628+ 000	refus
F-61-LM/TB	PK 629+ 000	10,00
PU-297-LM/TB	PK 629+ 500	4,00
PDL-294-LM/TB	PK 629+ 500	refus
PU-298-LM/TB	PK 631+ 000	4,00
PDL-295-LM/TB	PK 631+ 000	refus
PU-299-LM/TB	PK 632+ 500	4,00
PDL-296-LM/TB	PK 632+ 500	refus
PU-300-LM/TB	PK 634+ 000	4,00
PDL-297-LM/TB	PK 634+ 000	refus
PU-301-LM/TB	PK 635+ 500	4,00
PDL-298-LM/TB	PK 635+ 500	refus
F-62-LM/TB	PK 636+ 900	10,00
PU-302-LM/TB	PK 637+ 000	4,00
PDL-299-LM/TB	PK 637+ 000	refus
PU-303-LM/TB	PK 638+ 500	4,00
PDL-300-LM/TB	PK 638+ 500	refus
PDL-301-LM/TB	PK 640+ 000	refus
PU-304-LM/TB	PK 640+ 500	4,00
F-63-LM/TB	PK640+600	10,00
PU-305-LM/TB	PK 641+ 500	4,00
PDL-302-LM/TB	PK 641+ 500	refus

Annexe D-2 : Classification des sols selon UIC

Classification des sols (identification géotechnique)		Classe de qualité des sols
0.1	Sols organiques	QS0
0.2	Sols fins (comportant plus de 15 % de fines[a]) foisonnés, humides et donc non compactables	
0.3	Sols thixotropes[b] (quick-clay par exemple)	
0.4	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 organiques"[b]	
1.1	Sols comportant plus de 40 % de fines[a] (sauf sols 0.2)	QS1
1.2	Roches très évolutives Par exemple : - Craies de ρ_d < 1,7 t/m^3 et de friabilité forte - Marnes - Schistes altérés	
1.3	Sols comportant de 15 à 40 % de fines[a] (sauf sols 0.2)	QS1[c]
1.4	Roches évolutives Par exemple : - Craies de ρ_d < 1,7 t/m^3 et de friabilité faible - Schistes altérés	
1.5	Roches tendres Par exemple : Si microdeval en présence d'eau (MDE) > 40 et Los Angeles (LA) > 40	
2.1	Sols comportant de 5 à 15 % de fines[a]	QS2[d]
2.2	Sols comportant moins de 5 % de fines[a] mais uniformes ($C_U \leq 6$)	
2.3	Roches moyennement dures Par exemple : Si 25 < MDE ≤ 40 et 30 < LA ≤ 40	

ANNEXE E : Les épaisseurs minimales de la couche d'assise selon UIC719R

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

(e en mètres)

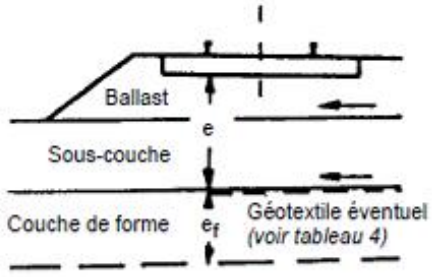


Fig. 9 - Calcul de l'épaisseur minimale "e" des couches d'assise

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.

Annexe F : Étude de stabilité remblai

Slope stability analysis Input data

Project

Date : 09/06/2020

Settings

Standard - safety factors

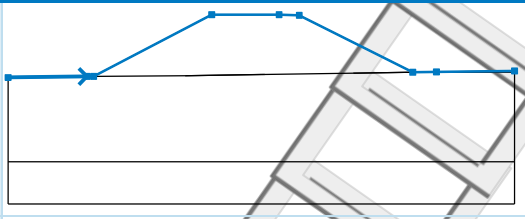
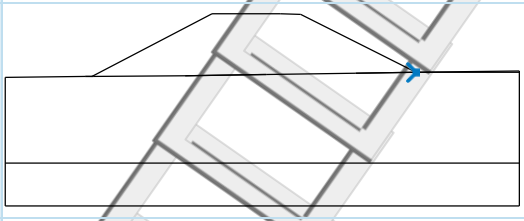
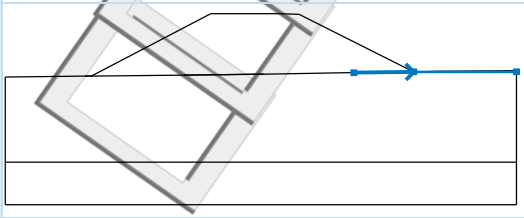
Stability analysis

Earthquake analysis :
Verification methodology : Standard

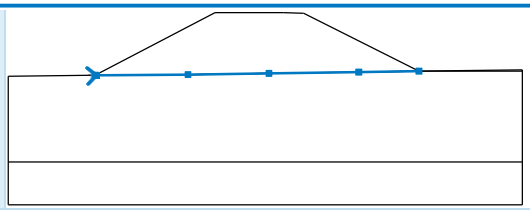
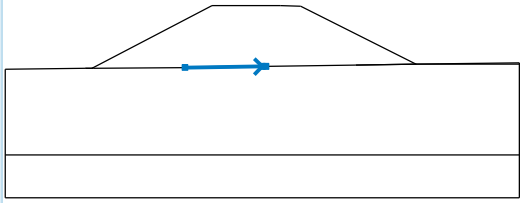
Safety factors (ASD)

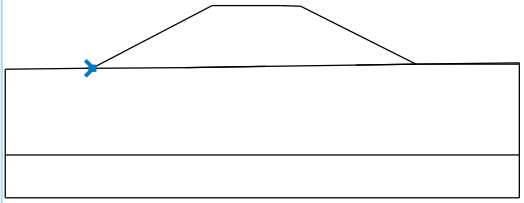
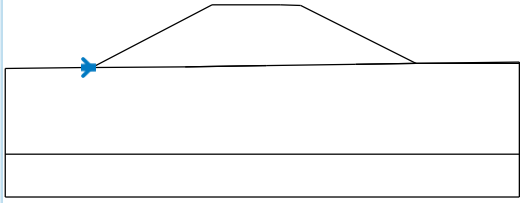
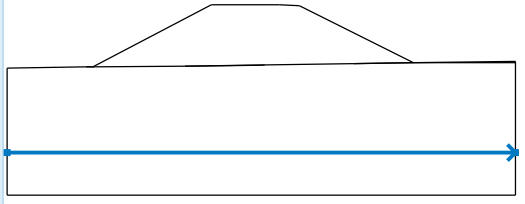
(			
Permanent design situation			
Safety factor :	SF_s =	1,50	[–]

Interface

No.	Interface location	Coordinates of interface points [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		0,00	10,00	9,34	10,12	10,12	10,13
		24,12	17,45	32,10	17,45	34,49	17,36
		47,94	10,62	50,74	10,67	60,00	10,77
2		47,94	10,62	47,95	10,62		
3		40,90	10,51	47,95	10,62	60,00	10,62
4		10,10	10,12	10,26	10,13	20,98	10,22
		30,43	10,35	40,90	10,51	47,94	10,62

[GEO5 - Slope Stability (demoversion) | version 5.2020.34.0 | Copyright © 2020 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.eu]

							
5		20,98	10,22	30,00	10,34	30,43	10,35

No.	Interface location	Coordinates of interface points [m]					
		x	z	x	z	x	z
6		10,12	10,13	10,26	10,13		
7		9,34	10,12	10,10	10,12	10,12	10,13
8		0,00	0,00	60,00	0,00		

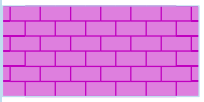
Soil parameters - effective stress state

No.	Name	Pattern	φ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	γ [kN/m³]
1	Remblai		30,00	5,00	20,00
2	Calcaire (sol support)		42,00	208,50	21,50

Soil parameters - uplift

No.	Name	Pattern	γ_{sat} [kN/m³]	γ_s [kN/m³]	n [–]

[GEO5 - Slope Stability (demoversion) | version 5.2020.34.0 | Copyright © 2020 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.eu]

1	Remblai		21,00		
2	Calcaire (sol support)		23,00		

Soil parameters
Remblai

Unit weight : γ = 20,00 kN/m3 effective
Stress-state :

Angle of internal friction : φ_{ef} = 30,00 °

Cohesion of soil : c_{ef} = 5,00 kPa

Saturated unit weight : γ_{sat} = 21,00 kN/m3

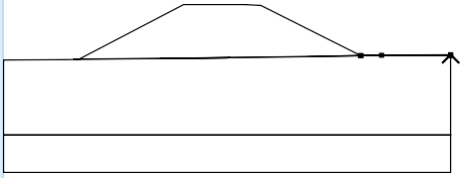
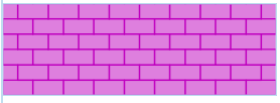
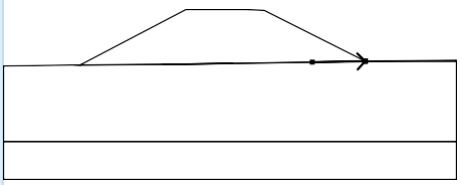
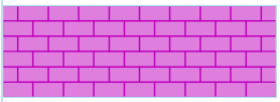
Calcaire (Unit weight : γ = 21,50 kN/m3 effective
Stress-state :

Angle of internal friction : φ_{ef} = 42,00 °

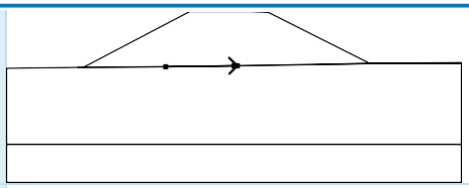
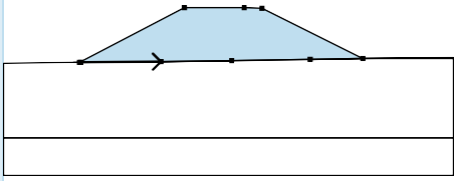
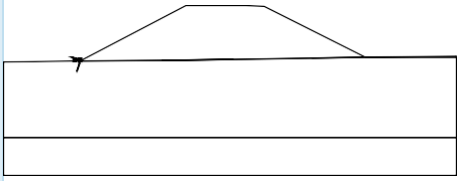
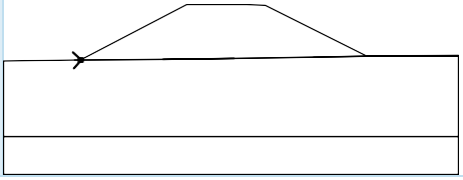
Cohesion of soil : c_{ef} = 208,50 kPa

Saturated unit weight : γ_{sat} = 23,00 kN/m

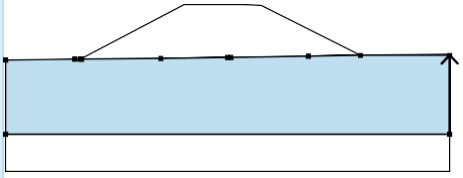
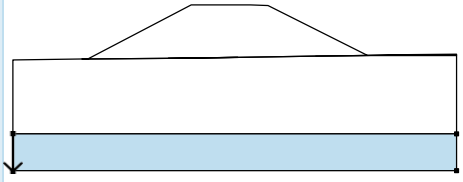
Assigning and surfaces

No.	Surface position	Coordinates of surface points [m]				Assigned soil
		x	z	x	z	
1		60,00	10,62	60,00	10,77	Calcaire (sol support)
		50,74	10,67	47,94	10,62	
		47,95	10,62			
2		40,90	10,51	47,95	10,62	Calcaire (sol support)
		47,94	10,62			
						
3		30,00	10,34	30,43	10,35	Calcaire (sol support)
		20,98	10,22			

[GEO5 - Slope Stability (demoversion) | version 5.2020.34.0 | Copyright © 2020 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.eu]

						
4		10,26	10,13	20,98	10,22	Remblai
		30,43	10,35	40,90	10,51	
		47,94	10,62	34,49	17,36	
		32,10	17,45	24,12	17,45	
		10,12	10,13			
5		10,10	10,12	10,12	10,13	Calcaire (sol support)
		9,34	10,12			
6		10,10	10,12	10,26	10,13	Calcaire (sol support)

sol support)

		10,12	10,13			
7		60,00	0,00	60,00	10,62	Calcaire (sol support)
		47,95	10,62	40,90	10,51	
		30,43	10,35	30,00	10,34	
		20,98	10,22	10,26	10,13	
		10,10	10,12	9,34	10,12	
		0,00	10,00	0,00	0,00	
No.	**Surface position**	**Coordinates of surface points [m]**				**Assigned soil**
		x	**z**	**x**	**z**	
8		0,00	0,00	0,00	-5,00	Calcaire (sol support)
		60,00	-5,00	60,00	0,00	

Surcharge

No.	Type	Type of action	Location z [m]	Origin x [m]	Length l [m]	Width b [m]	Slope α [°]	Magnitude q, q_1, f, F	q_2	unit
1	strip	permanent	on terrain	x = 28,00	l = 5,15		0,00	60,00		kN/m^2

Water

Water type : No water

Tensile crack

Tensile crack not input.

[GEO5 - Slope Stability (demoversion) | version 5.2020.34.0 | Copyright © 2020 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.eu]

Earthquake

Earthquake not included.

Settings of the stage of construction

Design situation : permanent

Results (Stage of construction 1)

Analysis 1

Slip surface parameters							
Center :	x =	47,22	[m]	Angles :	α_1 =	-45,16	[°]
	z =	33,78	[m]		α_2 =	1,73	[°]
Radius :	R =	23,16	[m]				
The slip surface after optimization.							

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : F_a = 356,41 kN/m kN/m

Sum of passive forces : F_p = 555,45 kNm/m

Sliding moment : M_a = 8254,42

Resisting moment : M_p = 12864,33 kNm/m

Factor of safety = 1,56 > 1,50

Slope stability ACCEPTABLE

Circular slip surface

[GEO5 - Slope Stability (demoversion) | version 5.2020.34.0 | Copyright © 2020 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.finesoftware.eu]

Annexe J :

Annexe J-1 : Implantation des appareils de voie

APPAREIL	TYPE	PK POINTE	Coordonnées Joint de contre-Aiguille		Coordonées Cœur		Coordonées Talon		Coordonées Talon	
			AX	AY	BX	BY	CX	CY	DX	DY
1	UIC60-500-1:12-DD	639+475,000	700415,867	3167613,582	700399,579	3167600,650	700383,292	3167587,718	700382,274	3167589,115
3	UIC60-300-1:9-DG	639+530,463	700372,431	3167579,094	700359,418	3167568,762	700346,406	3167558,431	700347,627	3167557,057
4	UIC60-300-1:9-DG	639+665,393	700273,785	3167486,342	700286,798	3167496,673	700299,810	3167507,005	700298,589	3167508,379
5	UIC60-300-1:9-DG	639+759,963	700265,954	3167480,124	700252,942	3167469,792	700239,930	3167459,461	700241,150	3167458,087
6	UIC60-300-1:9-DD	641+885,023	698535,47	3166106,130	698548,477	3166116,462	698561,490	3166126,793	698562,551	3166125,293
7	UIC60-300-1:9-DD	641+895,023	698527,631	3166099,910	698514,619	3166089,578	698501,606	3166079,247	698500,545	3166080,747
8	UIC60-300-1:9-DD	642+029,953	698414,933	3166024,857	698427,945	3166035,189	698440,957	3166045,52	698442,018	3166044,02
10	UIC60-500-1:12-DG	642+085,416	698371,496	3165990,369	698387,784	3166003,301	698404,071	3166016,233	698402,941	3166017,541

Annexe J-2 : Implantation des garages franc

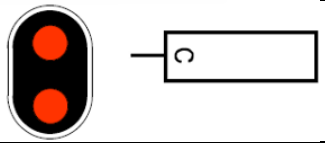
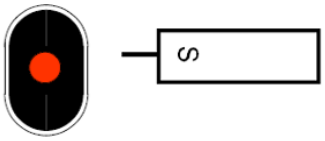
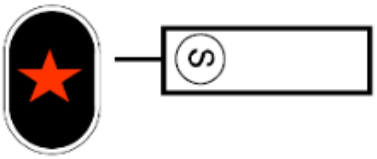
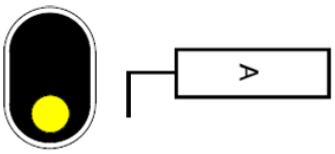
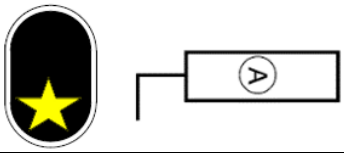
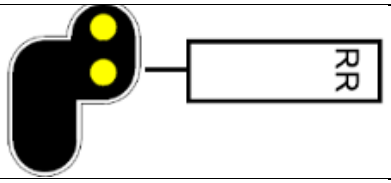
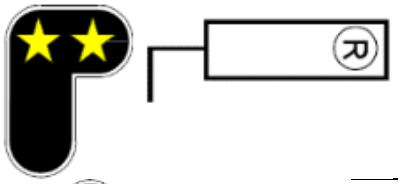
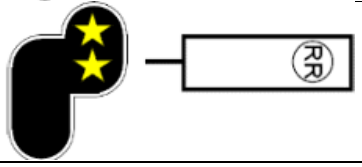
N°GF	PK GF	X	Y
G1	639+540,65	700364,112	3167574,817
G3	639+580,216	700334,613	3167546,725
G4	639+615,672	700311,603	3167518,711
G5	639+725,139	700228,137	3167447,754
G6	641+835,282	698575,564	3166135,626
G7	641+944,756	698487,532	3166070,414
G8	641+980,444	698455,032	3166054,353
G10	642+020,779	698420,984	3166031,990

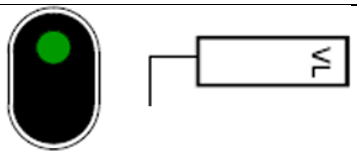
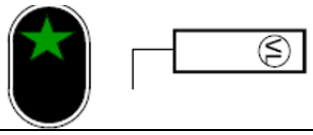
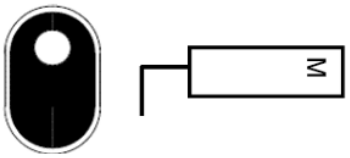
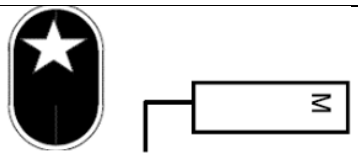
Annexe J-3 : Implantation des quais

1 2 3 4		COORDONNEES	
		X	Y
QUAI A	1	699408,851	3166831,45
	2	699413,826	3166825,184

	3	699643,799	3167017,996
	4	699648,773	3167011,731
QUAI B	1	699418,365	3166819,467
	2	699423,340	3166813,202
	3	699653,313	3167006,014
	4	699658,287	3166999,748

Annexe H : Types de signaux ferroviaires

Nom du signal	Représentation visuelle	Signification
Signal carré (C)		Commande l'arrêt obligatoire avant le signal. Franchissement interdit sans autorisation
Signal sémaphore (S)		oblige le mécanicien à s'arrêter avant le signal. Il indique que la voie suivante n'est pas encore libre.
Feu rouge clignotant		Le mécanicien peut avancer sans s'arrêter, mais seulement en marche à vue et à maximum 15 km/h, car la voie peut ne pas être totalement libre.
Feu jaune		Indique au mécanicien qu'il doit être prêt à s'arrêter avant un signal d'arrêt plus loin.
Feu jaune clignotant		Avertit le mécanicien qu'un signal d'arrêt est proche. Il doit ralentir et pouvoir s'arrêter à courte distance.
Ralentissement 30		Oblige le mécanicien à ne pas dépasser 30 km/h en passant sur un aiguillage ou un groupe d'aiguillages.
Rappel 30		Rappelle au mécanicien qu'il doit continuer à 30 km/h, même après avoir franchi le premier aiguillage.
Ralentissement 60		Oblige le mécanicien à ne pas dépasser 60 km/h en passant sur un aiguillage ou un groupe d'aiguillages.
Rappel 60		Indique au mécanicien qu'il doit rouler à 60 km/h maximum en passant sur un ou plusieurs aiguillages.

Signal de voie libre (VL)		Voie libre - Autorise la marche normale du train, si aucune autre indication ne l'interdit.
Feu vert clignotant		Indique au mécanicien d'un train roulant à plus de 160 km/h de réduire sa vitesse.
Signal de manœuvre (M)		Autorise ou confirme au mécanicien que le train peut circuler en manœuvre (déplacement lent et encadré dans une gare ou un triage).
Feu blanc clignotant		Il interdit dans tous les cas le départ en ligne d'un train.

Annexe J : Justification de l‘utilisation de traverse monobloc .

Objectif :

Le calcul est élaboré pour la conception, l’analyse et la vérification des traverses monobloc en béton précontraint d'une longueur de 2,6 m utilisé dans ce projet (voir annexe pour les dimensions) prévues pour les travaux de réalisation des tronçons de Béchar jusqu’à Gara Djebilet pour la voie lourde qui doit être supporté 32.5t par essieu (ligne minière ferroviaire Béchar – Tindouf – Gara Djebilet) en Algérie,

Ce choix de cette traverse est ;

- Conformément aux normes indiquées telles que l'EN.
- Le projet servira à la fois pour le transport de passagers et de marchandises, avec une traction à combustion interne à court terme,
- Transport des marchandises : le poids maximal par essieu du train est de 325kN, et la vitesse maximale d'exploitation prévue est de 70km/h ;
- Capacité annuelle de transport : 50 millions de tonnes ;
- Masse de remorque : 22 100 t ;
- Écartement des voies : 1 435 mm ;
- Type de voie : Voie ballastée, Long Rail Soudé ;
- Type de rail : UIC 60E1 ;
- Inclinaison du rail sur la verticale : 1: 20 ;
- Attaches : attaches élastiques ;
- Espacement des traverses : 0,6 m (1667 U/km).

Traverse

La traverse proposée à 2,6 m de long, utilisant un béton de qualité C50/60, configuré avec 16 fils d'acier de précontrainte de 7 mm de diamètre, la résistance ultime à la traction des fils d'acier de précontrainte est de fpk=1670MPa

Le but de cette note est de calculer les moments de conception de la traverse considérée de manière à vérifier que ses caractéristiques lui **permettent de reprendre les efforts auxquels elle sera soumise en voie.**

Les moments de conception de la traverse sont les moments caractéristiques et les moments de test. Leur définition suivant la norme EN 13230-6 est la suivante :

- **Moment caractéristique :**

  Moment nécessaire pour obtenir dans la traverse en fin de vie un effort de traction supérieur à la résistance en traction par flexion du béton sous chargement de fatigue.

- **Moment nécessaire** :

  Pour obtenir dans la traverse un effort de traction supérieur à la résistance en traction du béton par flexion. Ce moment étant dépendant du temps, on considère sa valeur à l’âge de 28j.

En conséquence, la progression de l'étude sera la suivante :

- Description de la traverse

- Calcul de la charge caractéristique

- Calcul des pertes de précontrainte

- Calcul des moments caractéristiques et des moments d'essai.

- Calcul des moments d'essai requis selon la norme EN 13230.

- Calcul des coefficients de sécurité.

La force de précontrainte à la détention ainsi que la force de précontrainte à long terme sont calculées conformément à l'EN 1992-1-1 comme recommandé dans la EN 13230-6 §6.2.7.

Les valeurs des différents paramètres sont directement extraites du document européen commun. Au besoin, des vérifications avec les valeurs des annexes nationales pourront être effectuées séparément.

Données d'entrée :

Caractéristiques de la voie

Nous résumons dans cette partie les principales caractéristiques de la voie.

- Type de rail 60E 1
- Largeur au pied du rail (brail) 150 mm
- Vitesse 70 km/h
- Charge de l'essieu 325 KN

Propriétés des matériaux

- **Béton**

- Classe de résistance du béton : C50/60.

Type de ciment : 52,5R.

- Résistance en traction par flexion du béton en fatigue fct,fl,fat: 3MPa.
- Résistance en traction par flexion du béton à 28 jours, fct,fl,28: 5,5MPa.

Acier de précontrainte

- Module d'Young de l'acier de précontrainte, Ep=205000MPa.

Les caractéristiques des aciers de précontrainte utilisés sont les suivantes :

Désignation	Diamètre	f,p,k	Fp,k	Fp,0,1,k	Section
Y1570C-10,5 EU	10,50mm	1570MPa	136,0KN	118 KN	86.6mm2

Description de la précontrainte

La position de chaque lit de précontrainte, le type et le nombre de fils pour chaque lit ainsi que la force appliquée à chaque fil sont décrits dans le tableau suivant :

N Layer	Nb Wire	Position	Tendons	F0
1	2	0,0505m	Y1570-10.5 EU	105 KN
2	2	0,1635 m	Y1570-10.5 EU	105 KN

Fabrication

La traverse peut être soumise à une cure thermique conformément aux indications de la EN 13230.

La détention est effectuée lorsque le béton a atteint une résistance de 30MPa.

Documents d'application :

La méthode de calcul est basée sur les recommandations de la norme EN 13230-6, Application ferroviaires - Voie - Traverses et supports en béton - Partie 6 : Conception.

Le calcul des pertes de précontrainte est effectué selon la norme EN 1992-1-1, Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.

Les traverses sont conçues pour une durée de vie de **40 ans.**

Calcul de la charge dynamique de la roue :

La valeur de la charge dynamique de roue, définie dans l'EN 13230-6, § 6.2.2, est :

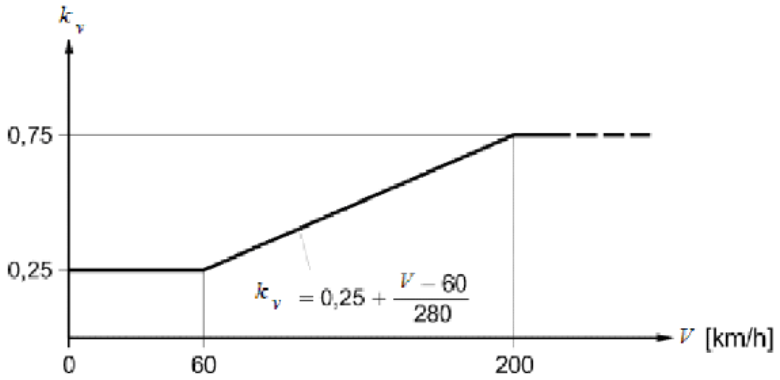
$$P_k = \frac{A_{nom}}{2}(1 + k_p \times k_v) \times k_d \times k_r$$

Avec :

- A_{nom} : charge à l'essieu statique (325 KN)

- kv : Incrément dynamique normal en service pour la charge de roue définie au § A.2.1 EN 13230-6

- Kv = 0,286 pour V = 70 km/h



kp : coefficient d'atténuation dû au patin sous le rail.

Kp = 0,89 tel que défini dans EN 13230-6 § A.2.3

kd = Coefficient de répartition de la charge

Kd = 0,5

kr = Coefficient tenant compte des irrégularités de roulement

Kr = 1,35 tel que défini dans EN 13230-6 § A.2.2.

Pk = 134.86 KN

Calcul des moments de flexion caractéristiques :

Calcul du moment de flexion caractéristique positif dans la section du rail:

Le moment de flexion positif au niveau de la section sous rail est calculé à l'aide de la formule donnée au §A3.2.1

$$M_{k,r,pos} = k_{ir}.\lambda.\frac{P_k}{2}$$

$$\lambda = \frac{L_p - e}{2}$$

$$\lambda = \frac{0.5385 - 0.1892}{2}$$

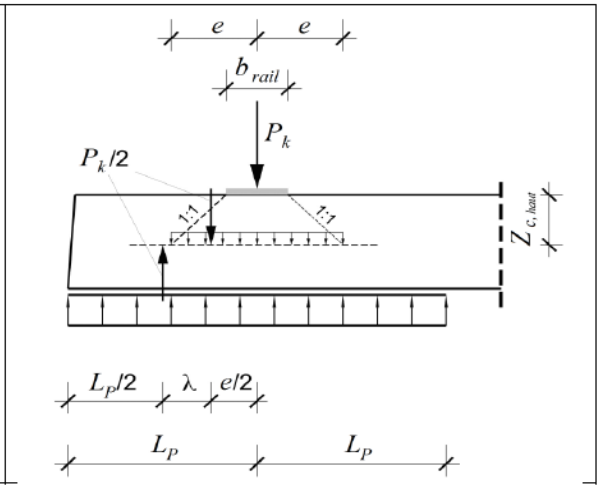
$$\lambda = 0.1746$$

$$e = \frac{b_{rail} + 2z_{c,haut}}{2}$$

$$e = \frac{0.15 + 2x0.1142}{2}$$

$$e = 0.1892$$

k_{ir} = 1.6 (Valeur recommandée)



On en déduit :

$$M_{k.r.pos} = 18.84\ KN.m$$

Calcul du moment de flexion caractéristique négatif dans la section du rail:

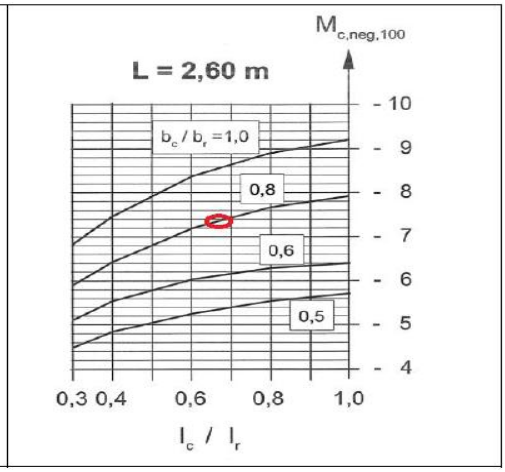
Pour une traverse de 2.6 m de long, le moment de flexion caractéristique négatif est obtenu par la formule suivante formula (§A3.2.2) :

$$M_{k.r.neg} = 0.5\ .M_{k.r.pos}$$

$$M_{k.r.neg} = -9.42\ KN.m$$

Calcul du moment de flexion caractéristique négatif dans la section du centre:

Le moment de flexion négatif au niveau de la section centrale est déterminé à l'aide des courbes précalculées au §A.3.3.1.3.2 :

$\frac{I_C}{I_r} = 0.67$ $\frac{b_C}{b_r} = 1$ $M_{c,neg,100} = -7.4\ kN.m$	

La valeur caractéristique est ensuite calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\boldsymbol{M_{k.c.pos} = 0.7.M_{k.c.pos}\ KN.m}$$

$$\boldsymbol{M_{k.c.pos} = 11.18\ KN.m}$$

Propriétés statiques des sections :

Les propriétés mécaniques des traverses dépendent de leur section sous rail et de leur section au centre. Dans la suite du paragraphe, les résultats suivants seront exposés :

- Caractéristiques des sections béton
- Caractéristiques des sections équivalentes béton + acier à la détention.
- Caractéristiques des sections équivalentes béton + acier à 28 jours.

Caractéristiques des sections béton :

Les sections sont calculées sans tenir compte des aciers de précontrainte.

	Sous rail	Centre
Surface de la section béton Ac (m2)	5,8843E-02	4,3500E-02
Hauteur du centre de gravité zGc (m)	1,059E-01	9,945E-02
Inertie de la section béton Ic (m4)	2,37E-04	1,57E-04
Périmètre de la section béton u (m)	0,682	0,588
Rayon moyen de la section béton h0 (mm)	173	148

Caractéristiques des sections équivalentes béton + acier à la détention :

Les sections équivalentes sont obtenues en remplaçant les fils de précontrainte par une section béton équivalente. Le coefficient d'équivalence acier/béton est défini comme le rapport du module d'Young de l'acier par celui du béton à l'âge considéré.

- Age du béton à la détention t= 1 d.
- Résistance à la compression du béton à la détention fcm(t)= 24,6 MPa.
- Module d'élasticité du béton à la détention Ecm(t)= 28,8 MPa.

- Coefficient d'équivalence acier/béton à la détention n(t)= 6,1.

	Sous rail	Centre
Surface de la section béton Ai (m2)	6,10E-02	4,56E-02
Hauteur du centre de gravité zGi (m)	1,06E-01	9,98E-02
Inertie de la section équivalente Ii (m4)	2,37E-04	1,57E-04
Bras de levier de la précontrainte ei (m)	0,0018	-0,00495

Caractéristiques des sections équivalentes béton + acier à 28 jours

- Résistance à la compression du béton à 28 jours fcm (28) = 58 MPa.
- Module d'élasticité du béton à 28 jours Ecm (28) = 37,3 MPa.
- Coefficient d'équivalence acier/béton à 28 jours s n (28) = 5,4.

	Sous rail	Centre
Surface de la section béton Ai (m2)	6,07E-02	4,54E-02
Hauteur du centre de gravité zGi (m)	0,105469498	0,09920469
Inertie de la section équivalente Ii (m4)	2,37E-04	1,57E-04
Bras de levier de la précontrainte ei (m)	0,0018	-0,00495

Effort de précontrainte :

Force de contrainte maximale :

On vérifie que la force appliquée à chaque fil lors de sa mise en tension n'excède pas la valeur maximale définie dans la formule suivante :

$$\boldsymbol{P_{max} = A_p . \sigma_{p.max}}$$

- σp.max est la contrainte maximale appliquée au tendon =min $\{\boldsymbol{K_1} . \boldsymbol{f_{pk}} ; \boldsymbol{K_2} . \boldsymbol{f_{p0,1k}}\}$

Avec $\boldsymbol{K_1}$ =0.8 et $\boldsymbol{K_2}$=0.95 étant donné que la force appliquée peut être mesurée avec une précision de +/- 5%.

Le résultat pour chaque lit est présenté dans le tableau suivant :

N Layer	F0	Pmax
1	105 KN	106.2 KN
2	105 KN	106.2 KN

La force totale appliquée à l'extrémité active des fils est 420 KN.

Pertes instantanées de précontrainte :

Pertes arbitraires :

Aucune perte arbitraire n'est prise en compte dans le calcul.

Une perte arbitraire de 0 % est considérée pour rendre compte des effets inhérents au processus de fabrication.

La perte correspondante est de 0.

Pertes par relaxation :

Ces pertes sont dues à la relaxation de l'acier de précontrainte entre sa mise en tension et sa détention. Elle est évaluée grâce à la formule suivante valable pour les aciers de classe 2 :

$$\frac{\Delta\sigma pr}{\sigma pi} = 0{,}66 \,.\, \rho 1000 \,.\, e^{9{,}1\,\mu} \,.\, \left(\frac{t}{1000}\right)^{0{,}75\,(1-\mu)} .10^{-5}$$

Avec :

- $\Delta\sigma_{pr}$ st la valeur absolue des pertes de relaxation de la précontrainte
- σ_{pi} pour la post-tension est la valeur absolue de la précontrainte initiale $\sigma_{pi}= \sigma_{pm0}$. Pour la précontrainte, σpi est la contrainte de traction maximale appliquée au tendon moins les pertes immédiates survenues pendant le processus de contrainte.
- t est le temps après la mise en tension (en heures).
- μ = σ_{pi} / f_{pk} est la valeur caractéristique de la résistance à la traction de l'acier de précontrainte.
- ρ_{1000} est la valeur de la perte de relaxation (en%). 1000 heures après la mise en tension et à une température moyenne de 20 ° C.

Pour rendre compte des effets du traitement thermique sur les pertes de précontrainte par relaxation, un temps équivalent est ajouté au temps après mise en tension, dans la formule précédente. Ce temps équivalent est estimé au moyen de l'expression suivante :

$$t_{eq} = \frac{1{,}14^{T_{max}-20}}{T_{max}-20} \sum_{i=1}^{n} \left(T_{(\Delta t_i)} - 20\right) \Delta t_i$$

L'application de cette formule avec le traitement thermique défini au §2.5 donne $\boldsymbol{T_{eq}} =$ **0** heures. Avec p1000=2.5% on obtient ΔPr=0.71

Pertes dues à la température

Dans le cas où les éléments sont soumis à une cure thermique, la réduction de la tension dans les armatures et la dilatation gênée du béton, du fait de la température, induisent une perte spécifique.

Cette perte est estimée au moyen de l'expression suivante :

$$\Delta P_e = 0{,}5 \; A_p \; E_p \; \alpha_c . [T_{max} - T_0]$$

Avec

- A_p est la section transversale des tendons
- E_p est le module d'élasticité des tendons
- α_c est le coefficient de dilatation thermique du béton
- $T_{max} - T_0$ est la différence entre la température maximale et la température initiale dans le béton près des tendons, en ° C

Avec Ap=346,4 cm2, Ep=205000 MPa, αc=1,00E-06 K-1 et Tmax-T0=35 °C, la valeur suivante est obtenue : ΔPθ=0.

Cette perte spécifique n'est pas considérée car la traverse n'est soumise à aucune cure thermique.

Perte due à la déformation élastique du béton :

La perte de précontrainte due au raccourcissement élastique du béton est estimée pour la section sous rail et la section au centre au moyen de l'expression suivante :

$$\Delta P_{el} = \frac{\frac{E_p}{E_c} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left[1 + \frac{A_i \cdot e^2}{I_i}\right]}{1 + \frac{E_p}{E_c} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left[1 + \frac{A_i \cdot e^2}{I_i}\right]} \cdot \left[F_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_r - \Delta P_\theta\right]$$

Avec ;

• Ep est le module d'élasticité des tendons

• Ec est le module d'élasticité du béton

• Ap est la section transversale des tendons

• Ac est la section transversale du béton

• Ai est la section équivalente

• Ii est l'inertie de la section équivalente

• ei est le bras de levier de la précontrainte

En considérant les caractéristiques des sections et des matériaux à la détention définies précédemment on obtient :

- Sous rail ΔPel=21.91 KN.
- Au centre ΔPel=29.25 KN.

Situation après la détention :

Force de précontrainte agissant après la détention :

On vérifie que la force de précontrainte dans chaque fil ne dépasse pas les valeurs maximales suivantes : $P_{m0}(x) = A_p \cdot \sigma_{pm0}(x)$

Avec k7=0.75 et k2=0.85.

Les résultats pour chaque lit sont donnés dans le tableau suivant :

N layer	Pm0	Pm max
1	97.51 KN	100.3 KN
2	97.51 KN	100.3 KN

La précontrainte totale appliquée à chaque section est :

- Sous rail, Pm0=397.38 KN.
- Au centre Pm0=390.04 KN.

Vérification des sections béton après la détention :

La contrainte de compression maximum calculée après la détention est σcmax=6.65 MPa.

Cette contrainte de compression dans le béton est acceptable étant donné qu'elle n'excède pas 0.60xfck(t)=0.60x20,3=12,2 MPa. (EN 1992-1-1 &5.10.2.2).

Pertes de précontrainte différées :

Les pertes en fonction du temps sont calculées en considérant :

- La réduction de l'allongement de l'armature causée par la déformation du béton sous charges permanentes, du fait du fluage et du retrait.
- La diminution de la contrainte de l'acier du fait de la relaxation.

Ces pertes sont calculées en utilisant l'expression simplifiée suivante :

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \, \Delta\sigma_{p,c+s+r} = A_p \, \frac{\varepsilon_{cs} \, E_p + 0.8 \, . \, \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} . \varphi(t \, , t_0) . \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_c} . \frac{A_p}{A_c} . \left[1 + \frac{A_c}{I_i} . Z_{cp}^2\right] \left[1 + 0.8 \, . \varphi(t \, , t_0)\right]}$$

Calcul du coefficient de fluage :

Le coefficient de fluage est calculé suivant les recommandations de l'Annexe B.1 de la norme EN 1992-1-1.

On rappelle les principales étapes de calcul

$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$

Avec:

- φ_0 est le coefficient de fluage théorique et peut être estimé à partir de:
  - $\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta_c(f_{cm}) \cdot \beta_c(t_0)$
    - φ_{RH} est un facteur permettant de tenir compte de l'effet de l'humidité relative sur le coefficient de fluage théorique:
      - $\varphi_{RH} = \frac{1-RH/100}{0{,}1 \cdot \sqrt[3]{h_0}}$ pour $f_{cm} \leq 35$ MPa
      - $\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1-RH/100}{0{,}1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1\right] \cdot \alpha_2$ pour $f_{cm} \geq 35$ MPa
      - RH est l'humidité relative de l'environnement ambiant en%
    - $\beta_c(f_{cm})$ est un facteur permettant l'effet de la résistance du béton sur le coefficient de fluage théorique:

$$\beta c(fcm) = \frac{16{,}8}{\sqrt{f_{cm}}}$$

      - f_{cm} est la résistance à la compression moyenne du béton en MPa à l'âge de 28 jours

Moments caractéristiques de la traverse :

Le moment caractéristique d'une section de traverse est le moment nécessaire pour obtenir en fin de vie un effort de traction supérieur à la résistance en traction par flexion du béton sous chargement de fatigue.

La valeur de la résistance en traction par flexion du béton sous chargement de fatigue est :

Moment caractéristique	Sous rail	Au centre
Mk pos	20.40 KN.m	14.80 KN.m
Mk neg	-17.75 KN.m	-16.50 KN.m

Moment d'essai

Le moment d'essai d'une section de traverse est le moment nécessaire pour obtenir dans la section un effort de traction supérieur à la résistance en traction du béton par flexion. Ce moment étant dépendant du temps, on considère sa valeur à l'âge de 28j soit :

Moment d'essai	Sous rail	Au centre
Mt pos	26.10 KN.m	18.80 KN.m

Mt neg	-23.10 KN.m	-21.10 KN.m

Vérification des contraintes :

Contrainte de traction admissible du béton :

Les traverses sont normalement conçues pour une durée de vie minimale de 40 ans. La capacité de charge de la traverse doit couvrir le moment de flexion caractéristique Mk, qui tient compte de la charge statique plus l'augmentation dynamique de service normal et la réaction de ballast inégale. Aucune fissure ne doit se produire à ce niveau de charge.

Cela signifie que pendant toute la durée de vie de la traverse, la contrainte de traction maximale $\sigma ct,max$ dans le béton due au moment de flexion Mk et aux effets de la précontrainte ne doit pas dépasser la résistance à la traction fct,fl,fat du béton sous des charges répétées.la formule suivante doit être vérifiée ;

$$\sigma_{ct,\max} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p \times e_p}{W} + \frac{M_k}{W} < f_{ct,fl,fat} \text{ in N/mm}^2$$

Avec :

$\boldsymbol{Np}$:La force de précontrainte résiduelle à la fin de la durée de vie de conception de la traverse, supposée ici de 40 ans
$\boldsymbol{A}$: La surface de la section transversale de la traverse,
$\boldsymbol{ep}$: Excentricité de la force de précontrainte ;
$\boldsymbol{W}$: Module de section ;
$\boldsymbol{Mk}$ - Moment caractéristique de flexion ;
$\boldsymbol{\sigma ct,max}$: La contrainte de traction du béton sous le moment de flexion caractéristique et en tenant compte du retrait et de la reptation.
$\boldsymbol{fct,fl,fat}$: Résistance à la traction du béton sous la charge de fatigue.

La contrainte de traction admissible du béton sous des charges de fatigue peut être estimée avec $\boldsymbol{fct,fl,fat} < \boldsymbol{3\ N/mm^2}$ pour la classe de résistance du béton C50/60

7.2. Contrainte de compression admissible du béton :

D'après la section 7.2 de l'EN 1992-1-1, la contrainte de compression maximale du béton de la traverse en béton doit être calibrée pour la durée de vie en fatigue avec une limite de contrainte de compression de $0{,}6fck$ = 30 MPa.

<u>Application numérique :</u>

Les feuilles de calcul suivants montrent les résultats de calcul effectués conformément à la norme EN 13230-6 version 2020.

Moment de flexion positif au niveau du rail avec $M_{k,r,pos}$

$$\sigma_{ct,max} = \frac{P}{A_r} + \frac{P.e_{pr}}{W_{r,bottom}} + \frac{M_{k,r,pos}}{W_{r,bottom}} = \left(\frac{-344.31}{0.06071} + \frac{-344.61x0,0018}{0.00227} + \frac{18.84}{0,00227}\right) x10^{-3} = 2.35\ MPa\ < 3\ MPa$$

Moment de flexion négatif au niveau du rail avec $M_{k,r,neg}$

$$\sigma_{ct,max} = \frac{P}{A_r} + \frac{P.e_{pr}}{W_{r,top}} + \frac{M_{k,r,neg}}{W_{r,top}} = \left(\frac{-344.41}{0,06071} + \frac{-344.61x0.0018}{-0,00211} + \frac{-9.42}{-0.00211}\right) x10^{-3} = -0.92\ MPa < 3MPa$$

Moment de flexion positif au milieu de la traverse avec $M_{k,c,pos}$

$$\sigma_{ct,max} = \frac{P}{A_c} + \frac{c}{W_{c,bottom}} + \frac{M_{k,c,pos}}{W_{c,bottom}} = \left(\frac{-334.45}{0,0454} + \frac{-334.45x - 0.005}{0.001588} + \frac{11.18}{0.001588}\right) x10^{-3} = 0.72\ MPa\ < 3\ MPa$$

Moment de flexion négatif au milieu de la traverse avec $M_{k,c,neg}$

$$\sigma_{ct,max} = \frac{P}{A_c} + \frac{P.e_{pc}}{W_{c,top}} + \frac{M_{k,c,neg}}{W_{c,top}} = \left(\frac{-334.45}{0,0454} + \frac{-334.45x - 0.005}{-0,001427} + \frac{-15.97}{-0,001427}\right) x10^{-3} = 2.65MPa\ < 3\ MPa$$

Nota :

- Le signe **négatif** indique que les contraintes sont en **compression.**
- Le signe **positif** indique que les contraintes sont en **traction**

Section sous rail :

Tonnage	M-Sous Rail	Np (MN)	Ar (m²)	epr (m)	Wr (m^3)	Mk (MN,m)	σ(Mpa)	Vérification	
32,5T	M+r (fibre INF)	-0,34431	0,06071	0,0018	0,002271	0,01884	2,3515	Ok	< 3 MPA
32,5T	M-r (fibre SUP)	-0,34431	0,06071	0,0018	-0,002113	-0,00942	-0,9208	Ok	< 3 MPA

Tonnage	M-Sous Rail	Np (KN)	A (m²)	ep (m)	Wr (m^3)	Mk (kN,m)	σ(Mpa)	Vérification	
32,5T	M+r (fibre SUP)	-344,31	0,06071	0,0018	-0,002113	9,42	-14,29	Ok	< -30 MPA
32,5T	M-r (fibre INF)	-344,31	0,06071	0,0018	-0,002271	18,84	-9,55	Ok	< -30 MPA

Section au milieu de la Traverse :

Tonnage	M-Central-Rail	Np (MN)	Ac (m²)	epr (m)	Wc (m^3)	Mk (MN,m)	σ(Mpa)	Vérification	
32,5T	M-r (fibre SUP)	-0,33445	0,0454	-0,005	-0,001427	-0,01597	2,6531	Ok	< 3 MPA
32,5T	M+r (fibre INF)	-0,33445	0,0454	-0,005	0,001588	0,011179	0,7274	Ok	< 3 MPA

Tonnage	M-Central-Rail	Np (KN)	A (m²)	ep (m)	Wc (m^3)	Mk (kN,m)	σ(Mpa)	Vérification	
32,5T	M+r (fibre INF)	-334,45	0,0454	-0,005	-0,001587	11,179	-15,46	Ok	< -30 MPA
32,5T	M-r (fibre SUP)	-334,45	0,0454	-0,005	-0,001426	15,97	-19,73	Ok	< -30 MPA

Calcul des moments de flexion d'essai :

Calcul du moment d'essai positive pour la section du rail Mt, r, pos :

Moment d'essai Mt,r,pos.

$$M_{t,r,pos} = M_{k,r,pos} + [(f_{ct,fl,t=28days} - f_{ct,fl,fat}) + (\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40years} - \Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28days})] \times W_{bot} = k_t \times M_{k,r,pos}$$

- $f_{ct,fl,t=28days} = 5{,}5\ N/mm^2$
- $f_{ct,fl,fat} = 3\ N/mm^2$
- $W_{rbot} = 2.24E\text{-}03 m^3$

$$\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40years} - \Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28days} = (P_{m,t2} - P_{m,t1}) \times (1/A_c + e_p/W_{r,bot}) = 0.794\ MPa$$

- **$M_{t,r,pos}$= 19.58 KN.m**

Calcul du moment d'essai négative pour la section du centre Mt, c, neg :

Moment d'essai Mt,c,neg.

$$M_{t,c,neg} = M_{k,c,neg} + [(f_{ct,fl,t=28days} - f_{ct,fl,fat}) + (\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40years} - \Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28days})] \times W_{top} = k_t \times M_{k,c,neg}$$

- $f_{ct,fl,t=28days} = 5{,}5\ N/mm^2$
- $f_{ct,fl,fat} = 3\ N/mm^2$
- $W_{ctop} = -1.85E\text{-}03\ m^3$

$$\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40years} - \Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28days} = (P_{m,t2} - P_{m,t1}) \times (1/A_c + e_p/W_{c,top}) = 0.867\ MPa$$

- **$M_{t,c,neg}$= -20.75 KN.m**

Coefficient de sécurité :

Les valeurs requises des moments de conception sont listées dans le tableau suivant :

Moment requis	**Sous rail**	**Au centre**
Mk pos	18,84 KN.m	
Mk neg		-15.97 KN.m
Mt pos	19.58 KN.m	
Mt neg		-20.75 KN.m

On en déduit les coefficients de sécurité correspondante :

Moment requis	**Sous rail**	**Au centre**
Mk pos	1.08	
Mk neg		1.03
Mt pos	1.18	
Mt neg		1.02

Le coefficient de sécurité minimum calculé pour la traverse est **1.02.**

Calcul des charges d'essai ;

Calcul des coefficients d'essai :

Pour obtenir les charges d'essai, nous devons d'abord calculer les coefficients ks et kd.

Coefficients k1s et k2s:

Prenant en compte les coefficients recommandés par la EN 13230-6 § A.4.2.1 et § A4.2.2 :

- K1s = 1,8x0,5/kd = 1.8
- K2s = 2,5x0,5/kd = 2.5

Coefficients k1d et k2s:

Prenant en compte les coefficients recommandés par la EN 13230-6 § A.4.2.1 et § A4.2.2 :

- K1d = 1,5x0,5/kd = 1.5
- K2d = 2,2x0,5/kd = 2,2

Calcul des charges d'essai initiales de référence

En tenant compte des recommandations du paragraphe 4.2.2 de l'EN 13230-2, on obtient :

L_p in m	L_r in m
$L_p < 0{,}349$	0,3
$0{,}350 \leq L_p < 0{,}399$	0,4
$0{,}400 \leq L_p < 0{,}449$	0,5
$L_p \geq 0{,}450$	0,6

D'après que Lp = 0.538 mm alors Lr = 0.6 et Lc = 1523.3 mm

Tenant en compte à nouveau les recommandations du paragraphe §4.3.1 de l'EN 13230-2 :

$$F_{r0} = (4xM_{k,\,r,\,pos)} / (Lr\text{-}0.1)$$

$$F_{c0} = (4xM_{k,c,pos}) / (Lc\text{-}0.1)$$

$$F_{c0} = (4xM_{k,c,neg}) / (Lc\text{-}0.1)$$

Nous garderons les valeurs suivantes :

	Charges d'essai initiales de référence (kN)
Fr0	150.72 KN
Fc0	31.42 KN
Fc0n	-44.88 KN

Critères d'acceptation :

On a :

- $\boldsymbol{F_{rr}}$= valeur pour laquelle la fissure initiale est obtenue pour le test positif sur le rail.
- $\boldsymbol{F_{crn}}$= valeur pour laquelle la fissure initiale est obtenue pour le test positif sur la section centrale.
- $\boldsymbol{F_{r0.05}}$= valeur pour laquelle une fissure résiduelle de 0,05 mm est obtenue pour le test positif sur le rail.
- $\boldsymbol{F_{rb}}$ = valeur pour laquelle une fissure résiduelle de 0,5 mm ou la rupture de la traverse est obtenue pour le test positif sur le rail.

- F_{c0} = charge d'essai de référence initiale positive en section centrale de la traverse
- F_{c0n} = charge d'essai de référence initiale négative en section centrale de la traverse
- F_{cr} = charge d'essai positive produisant la fissure initiale en section centrale de la traverse
- F_{crn}= charge d'essai négative produisant la fissure initiale en section centrale de la traverse
- F_{cB} = charge d'essai positive en section centrale, qui ne peut être augmentée
- F_{cBn}= charge d'essai négative en section centrale, qui ne peut être augmentée

Pour l'essai statique :

Critères d'acceptation	Valeurs numériques
$F_{rr} > 4\ M_{t,r,pos} / (Lr - 0,1) =$	**156.64 kN**
$Fr_{0,05} > k_{1s} \times F_{r0} =$	**271.30 kN**
$F_{rB} > k_{2s} \times F_{r0} =$	**376.80 kN**
$Fc_{r\,n} > 4\ M_{t,c,neg} / (Lc - 0,1) =$	**-58.31 kN**
$F_{c0,05n} > k_{1s} \times F_{c0n} =$	**-80,79 KN**
$Fcbn > k_{2s} \times Fc0n =$	**-112,20 KN**
$Fc_r > 4\ M_{t,c,POS} / (Lc - 0,1) =$	**40,82 KN**
$F_{c0,05} > k_{1s} \times F_{c0} =$	**56,56 KN**
$Fcb > k_{2s} \times Fc0 =$	**78,55 KN**

Pour l'essai dynamique :

Critères d'acceptation	Valeurs numériques
$Fr_{0,05} > k_{1d} \times F_{r0} =$	**226.08 kN**
$Fr_b > k_{2d} \times F_{r0} =$	**331.58 kN**