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'Etat

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Infrastructures de Base

Thème

Étude en APD de la nouvelle ligne minière ferroviaire BECHAR-GARA DJEBILET (TINDOUF) du PK795+00 au PK 821+000 avec conception d'une gare de bifurcation à TINDOUF

Présenté par :

Mlle LALIOUI Rayene

Mlle TAIRI Hana

Encadré par:

Mr. DAHMAN Fares

Promotion 2024 / 2025

© ENSTP-FJ – Garidi – Vieux Kouba


بسم الله الرحمن الرحيم

ملخص

تركّز هذه المذكرة على دراسة تفصيلية أولية لمقطع من خط السكة الحديدية المنجمية الجديدة ذات المسار الأحادي، الذي يربط مدينة تندوف بمنجم غار جبيلات، ويغطي المقطع الممتد من النقطة الكيلومترية 000+795 إلى النقطة الكيلومترية 000+821 بطول قدره 26 كيلومترًا. يشمل المشروع أيضًا تصميم وتهيئة محطة تراعي المعايير اللوجستية الخاصة بالمنطقة الصناعية.

تم تنفيذ هذا المشروع وفقًا لمعايير الاتحاد الدولي للسكك الحديدية، إضافة إلى توصيات الشركة الوطنية للنقل بالسكك الحديدية، وذلك لضمان ملاءمته لنقل كميات ضخمة من المواد الخام واحتوائه على البنية التحتية الملائمة لحمولة محورية تصل إلى 32.5 طن.

من أبرز التحديات التقنية التي تمت معالجتها في هذا المشروع

- تكييف التصاميم مع طبيعة التربة الصحراوية والظروف المناخية القاسية
- تحقيق التوازن بين السرعة، القدرة التحميلية، ومتطلبات السلامة
- مواءمة المسار مع التضاريس وتسهيل الربط مع باقي الشبكة الوطنية

لقد تم استعمال مجموعة من أدوات النمذجة الهندسية المتقدمة لإنجاز التصاميم، من بينها

AutoCAD 2020, COVADIS 2017, Civil 3D, AUTOPISTE, InfraWorks, SAS Planet, Google Earth Pro

RESUME

Ce mémoire porte sur une étude d'Avant-Projet Détaillé (A.P.D) d'un tronçon de la nouvelle ligne ferroviaire minière à voie unique, reliant la ville de Tindouf au gisement de Gara Djebilet. Le tronçon étudié s'étend du PK 795+000 au PK 821+000, sur une longueur totale de 26 km. Le projet inclut également la conception et l'aménagement d'une gare de triage destinée au transport de marchandises.

Ce projet a été réalisé conformément aux normes de l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) ainsi qu'aux recommandations de la Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF) en tenant compte des exigences liées à un trafic de fret intensif et à une charge à l'essieu pouvant atteindre 32,5 tonnes.

Parmi les principaux défis techniques relevés dans ce projet :
- L'adaptation des infrastructures aux sols désertiques et aux conditions climatiques extrêmes.
- L'optimisation du tracé pour garantir la sécurité, la capacité de charge et la performance.
- L'intégration harmonieuse dans le réseau ferroviaire national.

La modélisation géométrique et technique a été réalisée à l'aide de plusieurs logiciels spécialisés, notamment :

AutoCAD 2020, COVADIS 2017, Civil 3D, AUTOPISTE, InfraWorks, SAS Planet, Google Earth Pro.

Remerciement:

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, source de force, de sagesse et de patience, qui m'a permis d'aller au bout de ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements à **Monsieur DAHMANE Fares** et **Madame MAHIAOUI Mahdia Yasmine,** pour leur encadrement, tout au long de cette étude.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel de **GCB** et **SETS**, pour leur accueil chaleureux et leur disponibilité pendant toute la durée de mon stage.

Un grand merci à **l'ingénieur Tarek** du SETS pour votre aide et le temps que vous avez pris pour m'orienter et chercher avec moi des solutions, je vous remercie sincèrement.

Un remerciement spécial **l'ingénieure Amina** du GCB pour votre patience et votre aide précieuse.

Nous remercions sincèrement **Madame Belkais Slimani** pour son aide précieuse et son accompagnement tout au long de notre projet de fin d'études. Grâce à vous, cette étape a été plus claire, plus riche et plus motivante.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des professeurs de **l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP)**, qui m'ont transmis les connaissances et les compétences nécessaires à la réussite de cette étude.

Je remercie particulièrement **Monsieur MORSLI** et **Monsieur RAHMANI** pour vos soutiens précieux, son aide, ses conseils pertinents et le temps qu'il m'a généreusement consacré.

Mes remerciements vont aussi à **Mme Makoudi** et **Mme Bourebia** du **service de la scolarité DIB**, ainsi qu'à tout le personnel administratif de l'ENSTP pour leur appui et leur collaboration tout au long de mon parcours.

Enfin, je remercie du fond du cœur toutes les personnes, de près ou de loin, qui m'ont soutenu, encouragé et accompagné dans la réalisation de ce projet. À toutes et à tous, je vous exprime ma sincère reconnaissance.

DÉDICACE

À tous ceux qui me sont chers, à ceux à qui je dois la réussite de ce parcours :

Avant tout, à notre Seigneur, Dieu Tout-Puissant, le plus Miséricordieux, merci de m'avoir offert la vie, la santé, la patience et la force de continuer, merci pour la foi que Tu as ancrée en moi et pour les prières que Tu as exaucées dans les moments de doute, merci de m'avoir guidée, protégée et entourée des bonnes personnes tout au long de ce chemin. Sans Ta présence dans ma vie, rien de cela n'aurait été possible.

À celle qui m'a dit un jour que je suis la prunelle de ses yeux, qui voyait dans mon plus simple succès la plus grande réalisation, à la femme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui car elle est ***ma mère Chrifa****, celle dans les yeux de qui je vois la fierté de moi, mon modèle de respect et d'amour, de compréhension et de générosité. Celle qui a souffert pour moi sans jamais se plaindre, et qui, par sa force et son amour, est devenue une source d'inspiration dans ma vie. Grâce à toi, j'ai appris à être la fille qui ne cesse pas de faire tout pour te rendre heureuse et fière.*

À ceux dont les paroles m'accompagnent depuis que j'étais petite, ***À mes parents****, ce couple fort et courageux qui a souffert sans jamais nous laisser souffrir, ceux qui m'ont appris à être forte, à toujours poursuivre mes rêves, même quand les obstacles semblaient insurmontables. Mes anges gardiens, votre amour et votre présence dans ma vie, et le simple fait d'être vos enfants, continueront d'éclairer mon chemin.*

À mon premier ami d'enfance, mon épaule solide, celui qui m'a apporté le véritable sens de fraternité et les moments de bonheur, mes pensées les plus profondes s'adressent aussi à toi ***mon frère Hani Isaak****.*

À mes chers témoins des étapes de ma vie, dans mon succès, ma joie et mes moments de tristesse, à ***mon oncle Amari et mes tantes*** *du côté maternel, qui ont toujours été pour moi comme des frères et sœurs, je n'oublierai jamais vos encouragements permanents et vos soutiens moraux.*
Votre présence dans mon cœur est un trésor précieux que je chérirai toujours.

À Amel, Asmaa, Khawla, Melissa et Amina *mes sœurs que le cœur a choisies. Chaque étape de ma vie, vous étiez là, avec votre affection, votre écoute, votre force. Vous n'êtes peut-être pas mes sœurs de sang, mais vous l'êtes de l'âme. Merci d'exister comme vous êtes.*

À ma chère cousine ***Fatima Zahra****, mon amie d'enfance préférée, merci d'avoir toujours été là avec ta douceur et ton énergie positive. Ton amitié est un trésor qui illumine mon cœur depuis l'enfance.*

À ma binôme et copine ***Rayane*** *de toujours, ces 5 années d'université ont été une aventure incroyable à tes côtés. Merci pour ta patience, ton soutien et tous nos fous rires qui ont rendu ce parcours unique. Je suis tellement chanceuse de t'avoir eu près de moi à chaque étape.*

À toutes mes amies rencontrées tout au long de mon parcours universitaire, et à toutes les personnes formidables ***Safaa, Maria, Manal, Sara, Rokaia, Lydia, Newres, Imane et Larbi*** *que j'ai eu la chance de connaître, que ce travail soit l'accomplissement de vos rêves, portés par votre soutien indéfectible.*

À ***Madame Belkais Slimani****, merci du fond du cœur pour votre écoute, votre patience et votre présence tout au long de cette aventure. Vous avez cru en nous, et cela a fait toute la différence.*

Enfin, je dédie ce travail à moi-même, car il est temps d'assumer pleinement ce que je suis devenue !

TAIRI Hana

DÉDICACE

Je dédie ce travail :

***À mon père**, le plus exceptionnel des hommes, capable d'offrir à la fois la force, la tendresse et la sagesse. Toujours prêt à m'écouter, même quand je parle trop, à m'encourager, même quand je me décourage trop vite. Tu insistes pour que je mange, même quand je dis que je n'ai pas faim. Ces gestes simples montrent combien tu tiens à moi. Tes sacrifices silencieux ne font pas de bruit, mais moi, ta seule fille, je les entends fort. Grâce à toi, j'ai compris que l'amour, la tendresse, la gentillesse et la sagesse se montrent dans la patience, les regards discrets et cette force tranquille que tu m'offres chaque jour.*

***À ma mère**, la plus douce des superwomen, au cœur sensible. Tu fais tout, sans jamais le dire, toujours prête à en faire plus, sans rien attendre en retour. Chaque nuit, tu passes doucement voir si je dors bien, tu ajustes la lumière, tu t'assures que je ne manque de rien, sans bruit, sans mot, juste par amour. Tu me protèges en silence, tu me portes dans tes prières, tu me donnes de la force sans même t'en rendre compte. Tes sacrifices quotidiens sont invisibles aux yeux du monde, mais moi, je les vois, je les sens, je les garde en moi.*

Mes parents, chaque réussite que je célèbre aujourd'hui est aussi la vôtre. Que Dieu vous garde près de moi encore longtemps, en paix et en bonne santé.

***À mon cher frère Redha,** merci pour ton soutien constant, même à distance. Tu as suivi chaque étape de mon parcours, même mes notes, avec autant d'attention que si c'étaient les tiennes. Ton sérieux, accompagné de ton humour, m'a souvent redonné le sourire.*

***À mon cher frère Ibrahim**, le plus proche de mon cœur, merci pour ta patience pendant chaque période d'examen, quand je pleurais pour un rien, tu m'as toujours offert des mots rassurants et la force d'avancer, même quand moi-même j'y croyais à peine. À son épouse **khaouther** pour les bons moments que vous m'avez partagés*

***À mon petit frère Ismail**, la joie de notre maison, merci d'être toujours là, même quand on se dispute. Tu es mon partenaire de petites bagarres. Ton énergie et ta présence mettent de la lumière dans nos journées. À ta manière, tu es un vrai modèle : drôle, spontané, et toujours prêt à faire sourire.*

Grâce à vous, j'ai pu avancer avec confiance.

***À mes tantes et mes oncles,** merci pour vos câlins pleins d'amour, vos prières, même de loin, je sens toujours votre présence.*

***À mes cousins et cousines,** vous êtes tous spéciaux pour moi, merci pour les bons moments.*

***Chère amie Racha,** la meilleure d'entre toutes**,** tu as été bien plus qu'une amie, tu as été mon coach, ma conseillère, ta sagesse, ton calme, et tes conseils toujours justes. Grâce à toi, j'ai souvent repris confiance quand je doutais. Ton soutien m'a porté plus loin que tu ne peux l'imaginer.*

***À ma binôme et copine de chambre,** merci pour tous les moments partagés, les bons comme les mauvaise, merci d'avoir été là tout au long de ce parcours, chaque moment vécu donné du sens à se parcours*

À mes chères amies Asma, Asma, Sabrina et Hanane**,**Amira
Votre présence et votre aide ont rendu ce parcours plus léger, plus doux… et surtout rempli de rires.

*Enfin, je dédie ce mémoire à moi-même **Rayene la plus gentille des ingénieures** pour tous les efforts et les sacrifices que j'ai faits.*

Liste des Abréviations:

Abréviation	Signification
SNTF	Société Nationale des Chemins de Fer
ANESRIF	Agence Nationale des Etudes et Suivi de la Réalisation des Investissements Ferroviaires
UIC	Union Internationale des Chemins de fer
APD	Avant-Projet Détaillé
PK	Point kilométrique
FSR	Face supérieure de roulement
ADV	Appareils de voie
GF	Garage franc
VP	Voie principale
RN	Route nationale
PST	Partie supérieure du terrassement
ORP	Origine de raccordement progressif
FRP	Fin de raccordement progressif
Lu	Longueur utile (m)
WP	Limite de plasticité
WL	Limite de liquidité
IP	Indice de plasticité
γ h	Poids volumique humide (t/m³)
γ d	Poids volumique sec (t/m³)
γ opt	Poids volumique optimum (t/m³)
Wn	Teneur en eau naturelle
ωopt	Teneur en eau optimum
ϕ	Angle de frottement (°)
C	Cohésion du sol (bars)
T	Période de retour (ans)
tc	Temps de concentration (h)
P max,j	Pluies maximales journalières (mm)
i	Intensité de pluie (mm/h)
I	Pente moyenne (m/m)
Cr	Coefficient de ruissellement
Qa	Débit d'apport (m³/s)

SOMMAIRE :

INTRODUCTION GÉNÉRALE **2**
RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE : **4**
I.1 Introduction 4
I.2 Définition de l'Optimisation de la Géométrie 4
I.3 Objectifs de l'Optimisation Géométrique 4
I.4 Techniques Utilisées pour Optimiser la Géométrie 4
I.5 Matériaux Traditionnels Utilisés: 5
I.6 Matériaux Innovants dans l'industrie Ferroviaire 5
I.7 Conclusion: 6
CHAPITRE I : PRÉSENTATION DU PROJET **8**
I.1 INTRODUCTION : 8
I.2 DESCRIPTION DE PROJET : 8
I.3 PRÉSENTATION DE TRONÇON ÉTUDIÉ : 9
I.4 OBJECTIF DE PROJET : 9
I.5 SITUATION DE PROJET : 10
I.5.1 Relief : 10
I.5.2 Climat : 10
I.5.3 Sismicité : 11
I.6 CARACTÉRISTIQUE DE PROJET : 12
I.7 CONCLUSION : 12
CHAPITRE II :LA SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE : **14**
II.1 INTRODUCTION : 14
II.2 LES ÉLÉMENTS DE LA VOIE : 14
II.2.1 Le Rail : 14
II.2.2 Traverse : 17
II.2.3 Système d'attache : 18
II.2.4 Appareil de dilatation : 19
II.2.5 Appareil de voie : 20
II.2.6 Ballast : 21
II.3 CONCLUSION : 22

CHAPITRE III : TRACE EN PLAN 24
III.1 INTRODUCTION : 24
III.2 TRACE EN PLAN : 24
III.3 LES CONDITIONS ET LES RÈGLES À RESPECTER DANS LE TRACE EN PLAN : 24
III.4 LES ÉLÉMENTS DU TRACE EN PLAN : 25
III.4.1 L'alignement : 25
III.4.2 Arc de cercle : 25
III.4.3 La courbe de raccordement : 25
III.5 PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES : 26
III.5.1 Longueur minimum des éléments du tracé : 26
III.5.2 Rayon minimale : 26
III.5.3 Dévers : 27
III.6 APPLICATION AU PROJET : 31
III.7 LES CONTRAINTES RENCONTRÉES : 33
III.8 CONCLUSION : 33
CHAPITRE IV: PROFIL EN LONG 35
IV.1 INTRODUCTION : 35
IV.2 RÈGLES À RESPECTER DANS LE TRACE DU PROFIL EN LONG : 35
IV.3 ÉLÉMENTS GÉOMÉTRIQUES DU PROFIL EN LONG : 36
IV.3.1 Les déclivités droites : 36
IV.3.2 Raccordements de déclivités : 36
IV.4 PARAMÈTRES DU TRACE À RESPECTER : 36
IV.4.1 La déclivité maximale : 36
IV.4.2 Longueur minimale des déclivités : 37
IV.4.3 Rayon admissible en raccordements de profil en long : 37
IV.5 PARAMÈTRES DE PROFIL EN LONG : 37
IV.6 CONCLUSION : 38
CHAPITRE V : ÉTUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE : 40
V.1 INTRODUCTION : 40
V.2 MÉTHODE ET CRITÈRE DE CONCEPTION : 40
V.3 ÉTUDE HYDROLOGIQUE : 40
V.3.1 DESCRIPTION HYDROGRAPHIQUE DE ZONE DE PROJET : 40
V.3.2 CARACTÉRISTIQUE CLIMATIQUE : 41
V.3.3 BASSIN VERSANT : 45
V.3.4 Application pour notre projet : 52
V.4 ÉTUDE HYDRAULIQUE : 56
V.4.1 Les ouvrages transversaux : 56

V.4.2 Dimensionnement des ouvrages transversaux : 56
V.4.3 Dimensionnement des ouvrages longitudinaux : 65
V.5 ZONE INONDABLE 68
CHAPITRE VI: ÉTUDE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE : 70
VI.1 INTRODUCTION : 70
VI.2 ÉTUDE GÉOLOGIQUE : 70
VI.2.1 Situation géographique : 70
VI.2.2 Formes géomorphologiques : 71
VI.2.3 Aperçu géologique général : 71
VI.2.4 Aperçu géologique local : 72
VI.3 ÉTUDE GÉOTECHNIQUE : 73
VI.3.1 Programme d'investigation géotechnique : 73
VI.3.2 Essai in situ : 75
VI.3.3 Analyse et interprétation des résultats de la campagne géotechnique : 75
VI.3.4 Essais laboratoire : 78
VI.3.5 La lithologie de terrain : 81
VI.3.6 Matériaux de déblai : 83
VI.3.7 Matériaux de remblais : 83
VI.4 Zone d'inondable : 84
VI.5 CONCLUSION : 84
CHAPITRE VII : DIMENSIONELENT DE LA COUCHE D'ASSISE 86
VII.1 INTORDUCTION: 86
VII.2 STRECTURE COUCHE D'ASSISE: 86
VII.2.1 Couche ballast: 86
VII.2.2 Sous couche: 87
VII.2.3 La couche sous ballast : 87
VII.2.4 La plateforme: 87
VII.2.5 Couche de forme: 88
VII.3 Dimensionnement des couches d'assise: 88
VII.3.1 Classe de portance de la plateforme : 88
VII.3.2 Calcule l'épaisseur de couche d'assise : 89
VII.4 Conclusion : 91

CHAPITRE VIII : PROFIL EN TRAVERS 93
VIII.1 Introduction: 93
VIII.2 Les éléments constitutifs du profil en travers: 93
VIII.3 Le profil en travers du projet d'étude: 94
VIII.4 Calcule des cubatures: 94
VIII.5 Conclusion: 95
CHAPITRE IX : TERRASSEMENT ET OUVRAGE D'ART : 97
IX.1 LES TERRASSEMENTS : 97
IX.1.1 CONDITIONS DE RÉALISATION DES REMBLAIS : 97
IX.1.2 CONDITIONS DE RÉALISATION DES DÉBLAIS : 97
IX.1.3 PENTES ET TALUS : 98
IX.1.4 TASSEMENT : 98
IX.1.5 LA STABILITÉ : 98
IX.2 LES OUVRAGES : 101
IX.2.1 LES OUVRAGES D'ART DU PROJET : 101
IX.2.2 LES OUVRAGES HYDRAULIQUES: 101
IX.3 Conclusion: 101
CHAPITRE X : CONCEPTION ET AMÉNAGEMENT DE LA GARE 103
X.1 Introduction: 103
X.2 Les type des gares Ferroviaires: 103
X.3 Présentation Générale de la Gare de Bifurcation 103
X.3.1 Définition et Fonction: 103
X.3.2 Description Générale de la Gare: 104
X.4 Aménagements Fonctionnels de la Gare: 104
X.4.1 Voie de Garage Franc: 104
X.4.2 Heurtoir et Dispositifs de Sécurité en Fin de Voie: 105
X.5 Caractéristiques Géométriques des Gares: 106
X.5.1 La Longueur Utile d'une Voie de Stationnement: 106
X.5.2 Déclivité: 106
X.5.3 Les Appareils de Voie: 106
X.6 Alignement Droit Intermédiaire: 107
X.7 Application sur notre projet: 107
X.8 Assainissements: 108
X.8.1 Assainissement longitudinal: 108
X.8.2 Assainissement transversale: 108
X.9 Conclusion: 108

CHAPITRE XI : LA SIGNALISATION 110
XI.1 INTRODUCTION : 110
XI.2 LES RISQUES FERROVIAIRES : 110
XI.3 LE ROLE DE LA SIGNALISATION : 110
XI.4 TYPE DE SIGNALISATION : 111
XI.4.1 Les feux : 111
XI.4.2 Les blocs : 111
XI.4.3 Les panneaux : 113
XI.5 LE SYSTÈME ERTMS (EUROPÉEN TRAFIC MANAGEMENT SYSTEM) : 116
XI.5.1 Les composantes d'ERTMS : 116
XI.5.2 Implantation d'ERTMS : 116
XI.5.3 Les niveaux de ERTMS: 117
XI.6 Application pour notre projet 117
XI.7 CONCLUSION: 118
CHAPITRE XII: ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT : 120
XII.1 INTRODUCTION: 120
XII.2 IMPORTANCE DE L'ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT: 120
XII.3 DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT EXISTANT: 120
XII.4 ANALYSE DES IMPACTS DU PROJET SUR L'ENVIRONEMENT ET MESURES PRISES POUR LES MINIMISER : 121
XII.4.1 Impacts pendant la phase de réalisation 121
XII.4.2 Mesures prise : 122
XII.4.3 Impacts pendant la phase d'exploitation: 122
XII.4.4 Mesures prise: 122
XII.5 CONCLUSION: 123
CHAPITRE XIII: DEVIS ESTIMATIF ET QUANTITATIF: 125
CONCLUSION GENERALE:……...123

Listes des figures:

Figure I-1 : La ligne ferroviaire Gara Djebilet (Tindouf) – Bechar – Oran 8
Figure I-2 : Le tronçon étudié Bechar-Gara Djebilet (Tindouf) 9
Figure I-3 : Carte géologique de wilaya Tindouf 10
Figure I-4 : Diagramme ombrothermique de la région de Tindouf 11
Figure I-5 : Carte zonage sismique de l'Algérie 11
Figure II-1 : les éléments de rail vignoble 14
Figure II-2 : Profil du rail vignoble type UIC 60 15
Figure II-3 : la soudure aluminothermique ..... Error! Bookmark not defined.
Figure II-4 : traverse bibloc 17
Figure II-5 : traverse monobloc 18
Figure -II-6 : le système attache vossloh 19
Figure II-7 : appareil de dilatation 20
Figure II-8 : schéma d'un branchement simple 21
Figure II-9 : Schéma d'une traversé 21
Figure II-10 : la superstructure de la voie 22
Figure III-1: les éléments de tracé en plan 24
Figure III-2 : schéma de dévers pour un voie en courbe 28
Figure IV-1 : les éléments de profil en long 36
Figure V-1 : Localisation géographique de la zone d'étude 41
Figure V-2 : diagramme de variation des températures moyennes mensuelles 42
Figure V-3 : diagramme de pluviométrie mensuelle moyenne à Tindouf 43
Figure V-4 : Delimitation des BV sur la carte d'etat majort 46
Figure V-5 : schéma de dalot 58
Figure V-6 : shéma d'une buse 61
Figure VI-1 : Situation administrative du projet entre le PK 640+000 au PK 8 30+000. 70
Figure VI-2 : Formes géomorphologiques du projet Béchar Tindouf. 71
Figure VI-3 : Cadre géologique général de la zone du projet Béchar -Tindouf. 72
Figure VI-4 : Cadre local du projet Béchar – Tindouf entre le PK 640+000 au PK 830+000. 73
Figure VII-1 : les couches d'infrastructure ferroviaire 88
Figure VII-2 : Profil en coupe des couches d'assise avec épaisseurs 91
Figure IX-1 : Vérification de la stabilité de remblai avec une pente de 2H/1V 99
Figure IX-2 : Vérification de la stabilité de deblai avec une pente de 1H/3V 100
Figure X-1 : Garage franc 105
Figure X-2 : Les heurtoirs de sécurités 105
Figure X-3 : la longueur utile 106
Figure XI-1 : La prise en écharpe de train 110
Figure XI-2: Bloc automatique lumineux 111
Figure XI-3 : Bloc automatique à permissivité restreinte 112
Figure XI-4 : la signalisation disque 113
Figure XI-5 : Tableau indicateur de vitesse à distance 114
Figure XI-6 : tableau indicateur de la vitesse (TIV) 114
Figure XI-7 : TIVD de type B 115
Figure XI-8 : TIVD de type c 115
Figure XI-9 : TIVD et TIV 115
Figure XI-10 : Les composantes d'ERTMS 116
Figure XI-11 : les niveaux de ERTMS 117

Listes des tableaux:

Tableau I-1 : Les caractéristiques géométriques et techniques de projet....12
Tableau II-1 : caractéristiques du rail type UIC60....16
Tableau III-1 : valeurs de la courbure....25
Tableau III-2 : Limitation de la courbure....25
Tableau III-3 : Vitesse des trains maximale....26
Tableau III-4 : Valeurs minimales des éléments de tracé selon SNTF....26
Tableau III-5 : Valeurs limites du dévers (SNTF)....27
Tableau III-6 : Valeurs limites de la variation du dévers (SNTF)....29
Tableau III-7 : Valeurs limites de la variation du dévers (SNTF)....29
Tableau III-8 : Valeurs limites de l'Insuffisance du dévers (SNTF)....29
Tableau III-9 : Valeurs limites de la variation de l'insuffisance du dévers (SNTF)....30
Tableau III-10 : valeurs limites de l'excès du dévers (SNTF)....30
Tableau III-11 : valeurs limite géométrique de tracé....31
Tableau III-12 : Tableau récapitulatif des éléments de tracé en plan....33
Tableau III-13 : Tableau des contraintes rencontrées....33
Tableau IV-1 : Tableau des longueur minimale des déclivités....37
Tableau IV-2 : valeurs de rayon vertical minimal....37
Tableau IV-3 : Paramètres du profil en long....37
Tableau V-1 : Les températures mensuelles de la période entre (1992– 2020)....41
Tableau V-2 : Pluviométrie mensuelle moyenne de la période 1992-2020....42
Tableau V-3 : Données pluviométriques annuelle....43
Tableau V-4 : Pluies journalières maximales en mm....43
Tableau V-5 : Valeur du paramètre de Montana pour les différentes périodes de retour....44
Tableau V-6 : valeur intensité - durée – Fréquence (IDF).....44
Tableau V-7 : Les caractéristiques morphologiques de no bassins versants....47
Tableau V-8 : Le Temps de concentration calculé en 3 méthodes....49
Tableau V-9 : Coefficient C1 dépend de la pente du bassin versant....50
Tableau V-10 : coefficient C2 dépend de la nature du sol (perméabilité)....51
Tableau V-11 : coefficient de couverture végétale du bassin, versant....51
Tableau V-12 : variation de coefficient de ruissellement....51
Tableau V-13 : récapitulatif des paramètres hydrauliques des bassins versants pour les trois périodes de retour.....54
Tableau V-14 : Tableau récapitulatif des débits de crue pour les périodes de retour de 10 ans, 50 ans et 100 ans.....55
Tableau V-15 : Liste des Ouvrages prédimensionnés....57
Tableau V-16 : Tableau récapitulatif des dimensions des dalots avec les vérifications des conditions d'auto-curage....61
Tableau V-17 : Tableau récapitulatif des dimensions des dalots avec les vérifications des conditions d'auto-curage....63
Tableau V-18 : Liste globale des ouvrages projetés....64
Tableau VI-1 : programme géotechnique des sections en déblai....74
Tableau VI-2 : programme géotechnique des sections en remblai....74
Tableau VI-3 : programme géotechnique pour les ouvrages d'art....75
Tableau VI-4 : résultats de la lecture piézométrique....76

Tableau VI-5 : résultats d'essai PDL 76
Tableau VI-6 : résultats d'essai SPT 77
Tableau VI-7 : résultats des essais physiques de sondage carotté 78
Tableau VI-8 : résultats des essais physiques des puits de reconnaissance 80
Tableau VI-9 : la lithologie de terrain 81
Tableau VI-10 : Les gites d'emprunt 83
Tableau VII-1 : la classe de portance de la plateforme (Fiche UIC 719R) 89
Tableau VII-2: Tableau des coefficients pour notre projet 90
Tableau VII-3: épaisseurs et matériaux de couche d'assise 90
Tableau VIII-1: Les éléments du profil en travers 93
Tableau VIII-2 : Les cubatures des couches d'assise. 94
Tableau VIII-3 : Les cubatures des terrassements. 94
Tableau IX-1 : Les paramètres géotechniques du notre sols cas remblai 99
Tableau IX-2 : les résultats de calcul de stabilité de remblai 99
Tableau IX-3 : Les paramètres géotechniques du notre sols cas deblai 100
Tableau IX-4 : les résultats de calcul de stabilité de deblai 100
Tableau X-1 : longueur minimale de l'appareil de voie 107

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE:

Le transport ferroviaire depuis toujours joué un rôle essentiel dans le développement économique des pays, en conservant une place dominante dans le transport des marchandises et des voyageurs à faible coût.

Il impact directement la qualité de vie, la performance économique et la préservation de l'environnement. Grâce à sa faible empreinte carbone, le rail contribue grandement à la mobilité durable et au développement d'un système de transport respectueux de l'environnement.

Dans le cadre du développement et de la modernisation de transport ferroviaire, un projet majeur de cette modernisation est lancé par l'état algérien en collaboration avec l'Agence nationale d'études et de suivi de la réalisation des investissements ferroviaires (ANESRIF). Ce projet basé sur une étude de conception d'une nouvelle ligne ferroviaire (BECHAR-GARA DJBILLET) située ou sud-ouest de l'Algérie, dans le but d'exploiter le minerai de fer de Gara Djebilet.

La ligne BECHAR/GARA DJEBILET commence par la wilaya de Bechar, située dans la partie sud du Sahara, et suit la route Nationale N6 ainsi que la route Nationale N50, s'étendant vers le sud-ouest. Âpres avoir traversé la wilaya de Tindouf, elle tourne vers le sud jusqu'à la mine de fer de Gara Djebilet. La langueur totale de tracé est d'environ de 950 Km.

Notre projet de fin d'étude a porté sur étude en phase d'avant-projet détaillée (APD) d'un tronçon de 26 km, s'étendant du PK 795+000 ou PK 821+000. Ce projet comprend également la conception d'une gare de bifurcation aux environs du PK 808+000.

Notre travail est organisé da la manière suivante :

- Étude géométrique, géologique et géotechnique.
- Étude des contraintes.
- Dimensionnement de la structure d'Assise et des terrassements.
- Étude hydraulique et hydrologique.
- Profils en travers de la ligne de projet.
- Aménagement de la gare de bifurcation.
- Signalisation et impact sur l'environnement.
- En fin devis estimatif et quantitatif du projet.

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE :

Optimisation de la Géométrie des Voies Ferrées et Matériaux Utilisés

I.1 Introduction

Dans le cadre du projet de modernisation de la ligne ferroviaire Tindouf-Gara Djebilet, il est essentiel de garantir la sécurité et le confort de la voie. Cela passe par une optimisation de la géométrie ferroviaire et l'utilisation de matériaux adaptés et innovants. Ce chapitre présente les principes de cette optimisation, les techniques associées, ainsi que les matériaux traditionnels et nouveaux employés dans la construction et l'entretien des voies ferrées.

I.2 Définition de l'Optimisation de la Géométrie

L'optimisation de la géométrie ferroviaire consiste à concevoir et à adapter le tracé des voies pour atteindre des performances maximales. Elle vise à améliorer la sécurité, le confort et la régularité du trafic ferroviaire, tout en réduisant les coûts de maintenance.

I.3 Objectifs de l'Optimisation Géométrique

Les principaux objectifs sont :

- Réduire les charges et les efforts transmis à la voie.
- Assurer une stabilité de circulation.
- Améliorer le confort des passagers.
- Allonger la durée de vie des infrastructures.
- Diminuer les risques de déraillement.

I.4 Techniques Utilisées pour Optimiser la Géométrie

Technique	Description
Modélisation numérique	Utilisation de logiciels (AutoCAD, Civil 3D) pour concevoir la voie en prenant en compte les contraintes du terrain.
Relevés topographiques	Utilisation du GPS et du Lidar pour obtenir une précision millimétrique du terrain.
Nivellement et bourrage	Utilisation de machines (bourreuses, niveleuses) pour ajuster la position des rails.
Analyse dynamique	Étude des effets des charges mobiles sur la voie (vibrations, déformations).
Capteurs et surveillance	Installation de capteurs de déformation, drones, et caméras pour surveiller l'état des voies en temps réel.
Optimisation des courbes/pentes	Réduction de l'usure des rails et amélioration de la performance énergétique.

Les avantages sont nombreux :

- Meilleure régularité des vitesses des trains.
- Réduction de l'usure des rails.
- Amélioration de la stabilité et du confort.
- Diminution des vibrations.
- Réduction des risques de déraillement.

I.5 Matériaux Traditionnels Utilisés:

Matériau	Utilisation
Acier	Fabrication des rails pour sa solidité et sa résistance à l'usure.
Bois	Anciennement utilisé pour les traverses souple et facile à poser.
Béton	Traverses modernes, plus durables et adaptées aux lignes à forte charge.
Ballast	Pierres concassées pour stabiliser les traverses et absorber les vibrations.
Béton armé	Pour supporter les charges dynamiques.
Béton, briques, pierres	Construction des quais et bâtiments en gare pour leur solidité.
Aluminium	Utilisé dans les caténaires et systèmes de signalisation pour sa légèreté et sa conductivité.

I.6 Matériaux Innovants dans l'industrie Ferroviaire

L'innovation dans les matériaux permet de répondre aux exigences modernes :

- **Dalles en béton avec rails intégrés** : suppriment le besoin de ballast. Stabilité renforcée et entretien réduit.
- **Matériaux composites:** traverses en matériaux composites, légères, résistantes à la corrosion et durables.
- **Aciers haute performance :** offrent une plus grande solidité pour des rails plus légers et plus durables.

Bénéfices des matériaux innovants :

- Réduction du poids des structures.
- Moins d'énergie consommée pour la traction.
- Moins de maintenance.
- Solutions plus durables et écologiques.

I.7 Conclusion:

L’optimisation de la géométrie des voies et l’intégration de matériaux innovants constituent une avancée majeure dans le développement du transport ferroviaire. Pour des projets comme celui de la ligne Tindouf-Gara Djebilet, ces éléments sont essentiels pour garantir un réseau moderne, fiable et durable. Il est recommandé de renforcer les compétences locales en géométrie ferroviaire, d’adopter des normes claires, et de collaborer avec des partenaires internationaux pour bénéficier de leurs retours d’expérience.

PRÉSENTATION DU PROJET

I. CHAPITRE I : PRÉSENTATION DU PROJET

I.1 INTRODUCTION :

Le transport ferroviaire représente un facteur critique du développement économique, tant au niveau national qu'à l'échelle mondiale.

L'autorité algérienne a ordonné la réalisation de la ligne Bechar-Tindouf (Gara Djebilet). Cette ligne ferroviaire permettra l'extension, le maillage et l'interconnexion entre la wilaya d'Oran (Arzew) et les wilayas du sud-ouest (Bechar – Tindouf), afin de faciliter le transport du minerai de fer et de relancer la mobilité économique dans le sud.

I.2 DESCRIPTION DE PROJET :

Le projet porte sur la construction d'une nouvelle ligne minière Ouest, à voie unique, destinée au transport de passagers et de marchandises. Elle relie Tindouf (Gara Djebilet) à Bechar (complexe FERAAL Toumiat) sur une longueur de **970 km** (tronçon sud). Ce tronçon est divisé comme suit:

- **940 km** de Tindouf (Gara Djebilet) à Bechar – bifurcation.
- **30 km** de Bechar - bifurcation au complexe FERAAL Toumiat (situé au nord de Bechar).

Ensuite, le tronçon nord relie Bechar (complexe FERAAL Toumiat) à Oran (Port Arzew) sur une distance de **732 km**.

Cette ligne est conçue pour assurer le transport de plus de **50 millions de tonnes** de minerai de fer vers les centres industriels et portuaires d'Oran, en traversant les régions d'Abdala, Hammaguir, Hassi Khebi, Oum L'Assel et Tindouf.

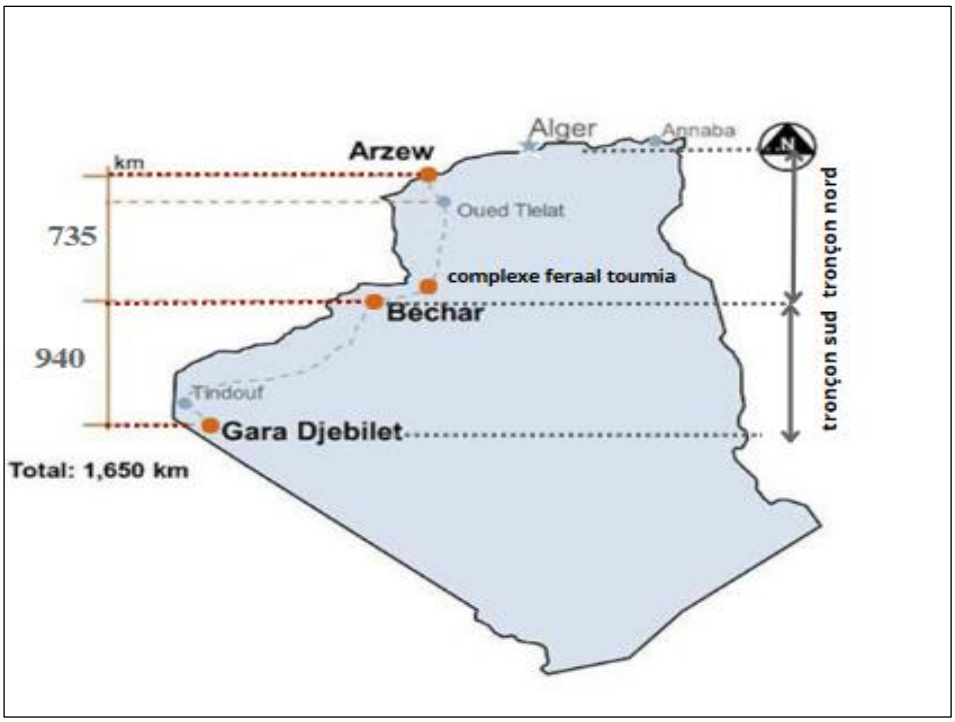


Figure I-1 La ligne ferroviaire Gara Djebilet (Tindouf) – Bechar – Oran

I.3 PRÉSENTATION DE TRONÇON ÉTUDIÉ :

Le présent projet a pour but une étude d'avant-projet détaillé (APD) d4un tronçon la ligne de fer Bechar-Tindouf (Gara Djebilet).

Notre projet est situé sur le tronçon sud, dans la section 5**,** sur une longueur de **26 km**, entre les points kilométriques **PK 795+000** et **PK 821+000**, en direction de Tindouf. Ce tronçon est principalement longé par **la Route Nationale N50**, qui relie la wilaya de Bechar à celle de Tindouf.

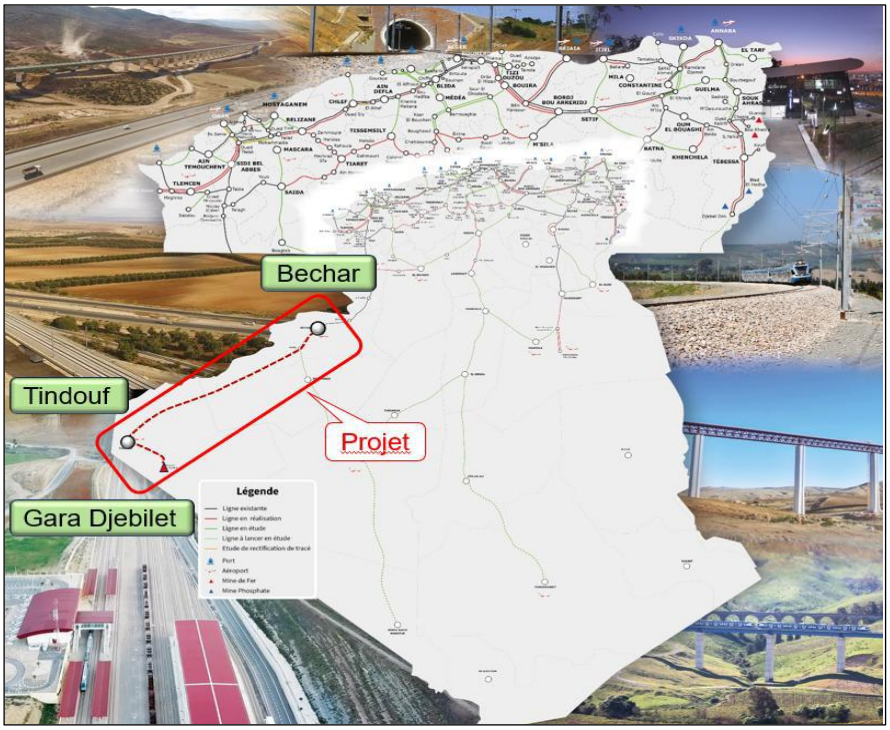


Figure I-2 : Le tronçon étudié Bechar-Gara Djebilet (Tindouf)

I.4 OBJECTIF DE PROJET :

- Renforcer l'économie algérienne en développant une infrastructure ferroviaire stratégique.
- Relier les gisements de minerai de fer sur un tracé de **950 km.**
- Faciliter le transport des marchandises vers les centres de transformation et les ports.
- Optimiser l'exportation du minerai de fer en l'acheminant jusqu'au port d'Arzew.
- Augmenter la compétitivité sur les marchés internationaux grâce à une logistique améliorée.

I.5 SITUATION DE PROJET :

I.5.1 Relief :

La zone d'étude se situe dans une région désertique à une altitude moyenne de 467 m, avec un relief globalement plat. La géomorphologie de la région est dominée par un vaste plateau compose de terrains paléozoïques et d'une partie de l'axe cristallin. Trois principales unités géologiques se distinguent :

- La Hamada de Tindouf (Nord-Ouest) : Un ensemble de grès argileux reposant sur un conglomérat et recouvert des dalles calcaires tufacées ou dolomitiques, avec des lits entrecroisés. Son épaisseur varie d'Ouest en Est, allant de quelques mètres à 200 mètres.
- La cuvette de Tindouf : Située entre deux plateaux, cette dépression est le résultat de l'érosion et de la déflation. Elle abrite la sebkha de Tindouf, un bassin collecteur où l'évaporation des eaux de ruissellement entraîne une forte concentration en sels.
- La Hamada El Aroueta (Sud-Est) : Un plateau caractérisé par des formations de grès grossiers à stratification.

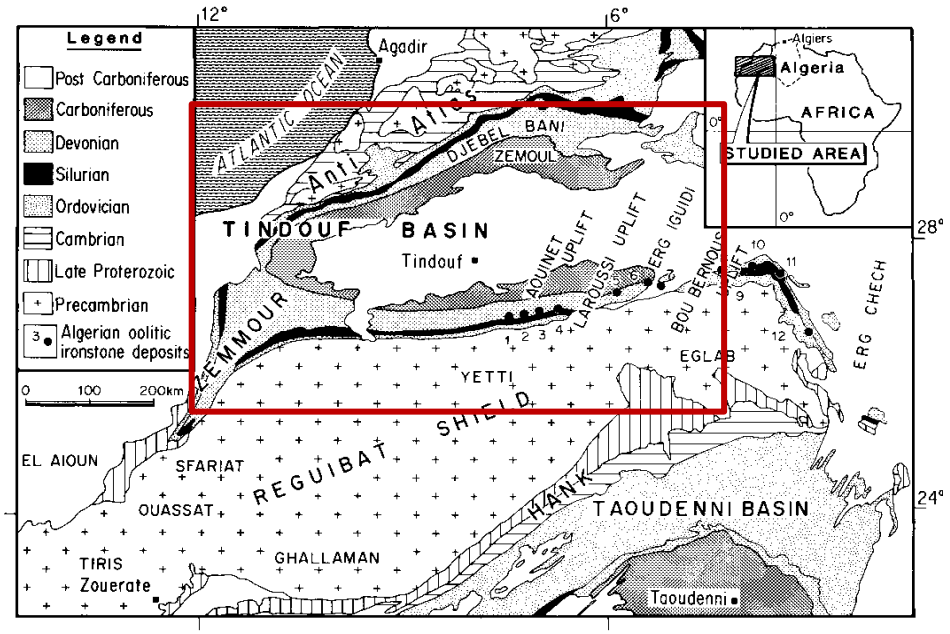


Figure I-3 : Carte géologique de la wilaya de Tindouf

I.5.2 Climat :

Le climat de la région de Tindouf est de régime désertique (subtropical désertique). Il est marqué par des étés chauds et secs tout au long de l'année et des hivers arides avec des nuits froides.

Les températures de la zone étudiée reflétent des conditions extrêmes. La température maximale est enregistrée au mois de juillet où elle dépasse les **40°C**. Le mois de janvier est le plus froid avec une température minimale atteignant les **7°C**.

Les précipitations annuelles sont très faibles, totalisant **65 mm**. Elles sont presque inexistantes en avril, juin et juillet, avec **1 mm**, et atteignent leur maximum en septembre, avec **14 mm**

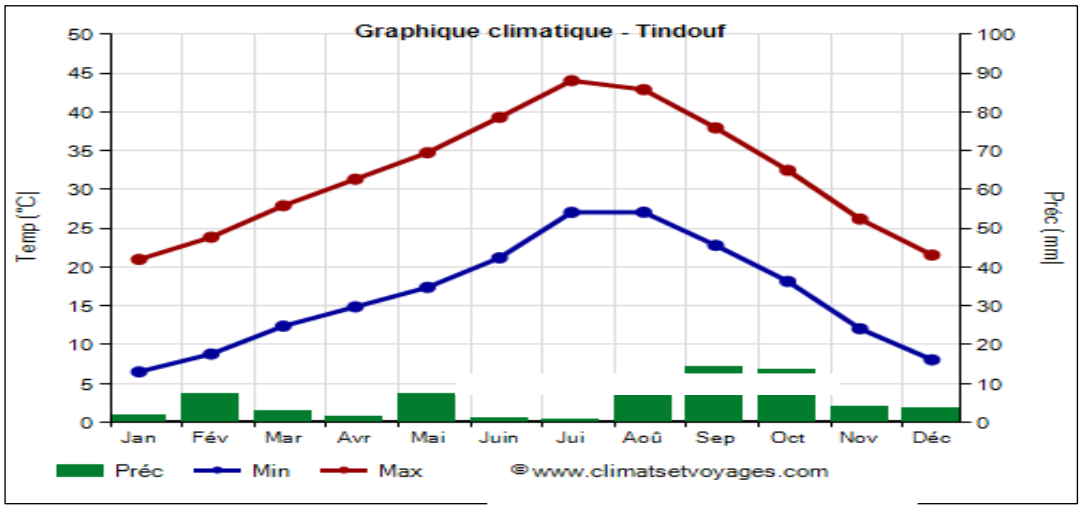


Figure I-4 : Diagramme ombrothermique de la région de Tindouf

I.5.3 Sismicité :

La zone d'étude (Tindouf) est située au sud-ouest de l'Algérie. Selon le RPOA 2008, le territoire algérien est subdivisé en cinq zones de sismicité croissante :

- Zone 0 : sismicité négligeable.
- Zone I : sismicité faible.
- Zone II-a : sismicité moyenne.
- Zone II-b : sismicité élevée.
- Zone III : sismicité très élevée.

Donc La wilaya de Tindouf est classée dans la zone 0, signifiant une sismicité très faible, considérée comme négligeable

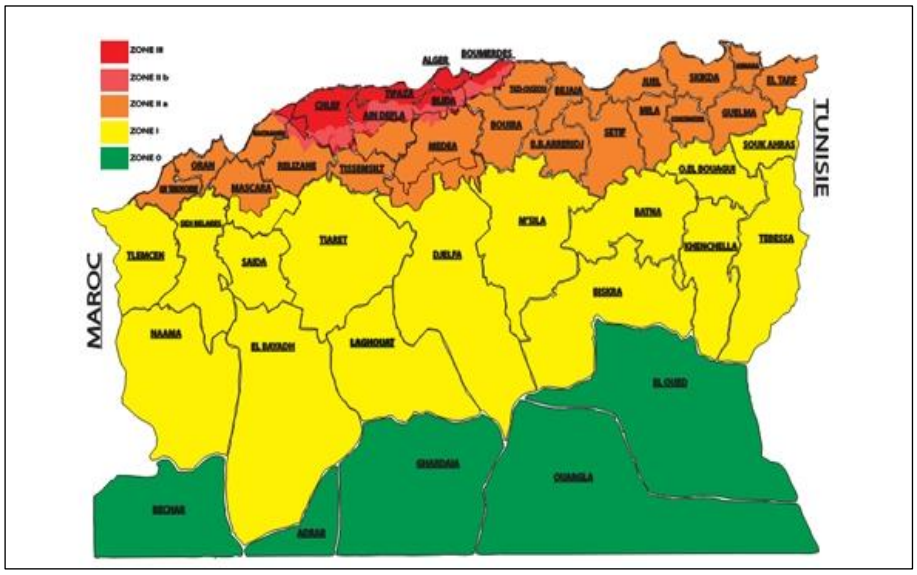


Figure I-5 : Carte zonage sismique de l'Algérie[11]

I.6 CARACTÉRISTIQUE DE PROJET :

Les caractéristiques géométriques et techniques de ce projet seront basées sur les normes SNTF et UIC, ainsi que sur les résultats de l'étude du plan de transport.

Tableau I-1 Les caractéristiques géométriques et techniques de projet

CARACTÉRISTIQUES DE BASE	
Longueur de la ligne Minière	950 km
Longueur de tracé	26 km
Trafic	Mixte voyageurs marchandises
Minerais transporté	Le Fer
Vitesse de circulation des trains chargés	70 Km/h
Vitesse de circulation des trains vides	120 Km/h
Nombre de trains chargés et vides circulant par jour	08 trains
CARACTÉRISTIQUE TECHNIQUE	
Écartement standard	1 435 mm en alignement
Charge à l'essieu	32,5 tonne
Le rail utilisé	Type UIC 60 E1 (60,21 kg/ml)
Traverses utilisées	Monobloc en béton précontraint
Mode de traction	Diesel
Croisement de routes	Passage à niveau

I.7 CONCLUSION :

En conclusion, ce chapitre a présenté la vision globale et les caractéristiques essentielles du projet, avec un focus sur le tronçon étudié. Dans le chapitre suivant, nous aborderons en détail la superstructure de la voie pour mieux comprendre ses aspects techniques et stratégiques.

SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE

II. CHAPITRE II :LA SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE :

II.1 INTRODUCTION :

On désigne comme superstructure l'ensemble des parties supérieures d'une construction, c'est-à-dire les éléments situés au-dessus du niveau du sol. Dans le domaine ferroviaire, la superstructure regroupe des composants essentiels tel que les rails, traverses, systèmes de fixation, ballast et autres équipements qui assurent la stabilité et la sécurité de la voie. Confrontée à des contraintes statiques et dynamiques, la superstructure doit absorber et transmettre les charges générées par le passage des trains.

Ce chapitre présente en détail les différents éléments constituant la superstructure ferroviaire, leur rôle dans la performance du réseau et les enjeux liés à leur maintenance et à leur évolution technologique.

II.2 LES ÉLÉMENTS DE LA VOIE :

II.2.1 Le Rail :

Les rails sont des barres d'acier profilées qui assurent le guidage et le support des trains. Ils offrent une surface stable, garantissant la sécurité lors du roulement des roues.

Les rails modernes de type vignoble (ou patin) se caractérise par la forme et la composition chimique du rail. La forme : se compose de trois parties principales :

- **Le patin :** partie inférieure et élargie du rail qui permet une fixation sur la traverse
- **Le champignon :** partie supérieure du rail sur laquelle les roues du train roulent
- **L'âme :** partie verticale qui relie le champignon au patin.

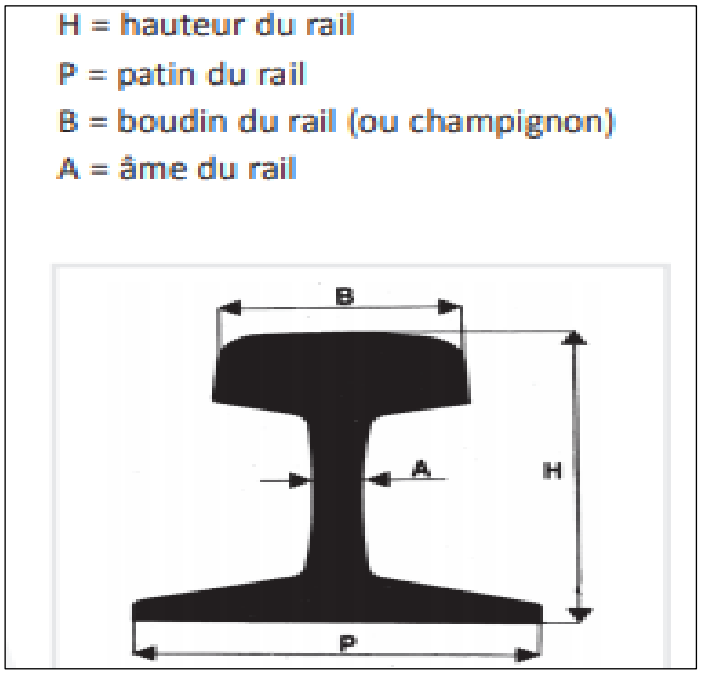


Figure II-1 : les éléments de rail vignoble

➢ **La composition chimique du rail :**

- Teneur en carbone : de 0.6 % à 0.8%.
- Teneur en silicium : de 0.1 % à 0.6 %.
- Teneur en manganèse : de 0.1 % à 0.6 %.

Cette composition rend le rail dur et permet de supporter les contraintes élevées.

L'inclinaison des rails :

- Généralement les rails sont inclinés par rapport au plan de roulement, avec une pente de 1/20, afin d'assurer le centrage des roues du train.

➢ **Pour notre projet :** Le type de rail utilisé est l'UIC-60 E1.

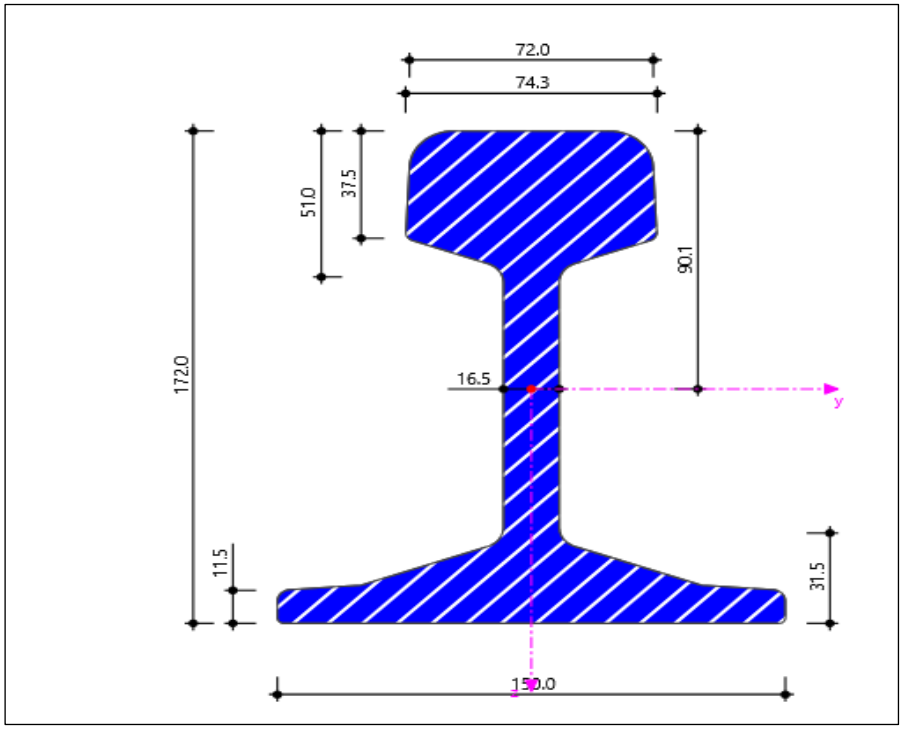


Figure II-2 : Profil du rail vignoble type UIC 60

Tableau II-1 : caractéristiques du rail type UIC60

Les caractéristiques	La valeur
Poids	60.2 Kg/m
Aire de la section	76.7 cm^2
Largeur du champignon	72 mm
Largeur du patin	150 mm
Hauteur du rail	172 mm
Épaisseur de l'âme	16.5 mm
Moment d'inertie (axe y-y)	3038.3 cm^4
Moment d'inertie (axe z-z)	512.3 cm^4

II.2.1.1 ASSEMBLAGE DES RAILS :

Les rails, fabriqués en longueurs de 18 à 36 mètres, doivent être reliés pour assurer la continuité de la voie. Deux techniques sont utilisées l'éclissage consiste à fixer de pièces métalliques fixées par boulons et le soudage électrique (se fait dans des ateliers**)** ou aluminothermique (se fait sur chantier) pour obtenir de longs rails soudés. Les éclisses présentent des points faibles, car leurs joints peuvent se dégrader sous l'effet des charges mais le soudage offre une continuité robuste, garantissant ainsi une meilleure durabilité et sécurité de la voie.

- **Pour notre projet :**

  Les barres seront assemblées par soudure électrique tous les 18 mètres, et par soudure aluminothermique tous les 288 mètres.

II.2.2 Traverse :

Les traverses sont des éléments placés perpendiculairement à la voie ferrée, ancrés dans le ballast afin de maintenir l'écartement des rails et de fixer leur position. Elles relient les rails entre eux et transmettre les charges vers le sol (entre 2 travers 0.6 m).

✓ Il existe 3 types de traverses :

- **Traverse en bois**
- **Traverse en acier**
- **Traverse en béton (armé ou précontraint)** :

→ Traverse bibloc :

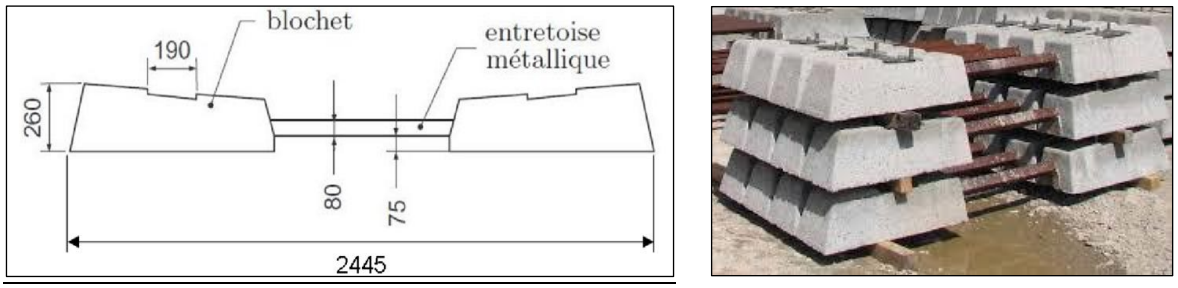


Figure II-3 : traverse bibloc

→ Traverse monobloc :

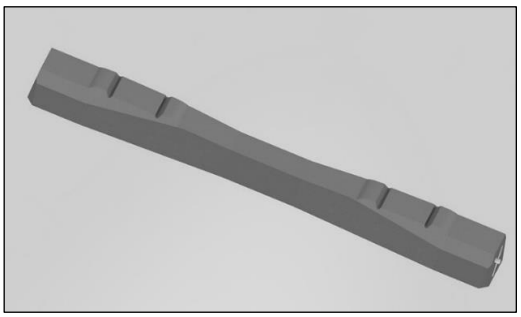


Figure II-4 : traverse monobloc

→ **Pour notre projet** : les traverses de notre projet seront des monoblocs en précontrainte spécialement conçues pour supporter les charges élevées associées au transport de minerais lourds. Ces traverses présentant une hauteur de **0.225 m**, garantissant une excellente rigidité verticale

II.2.3 Système d'attache :

Il s'agit d'un système de fixation permettant d'installer le rail sur la traverse pour amortir les vibrations induites par la circulation ferroviaire alors transmet les charges entre le rail et les traverses et qui maintient l'écartement.

- Système d'attache rigide :

Ce système ne compense pas bien les vibrations et ne permet pas un mouvement suffisant du rail, ce qui peut entraîner un glissement du rail.

- Système d'attache élastique :

Le système d'attache élastique est composé d'un boulon, d'une pièce élastique et de butées. Il permet d'absorber une partie des vibrations du train et autorise une circulation avec des grandes vitesses. Les butées en plastique servent à bloquer le rail sur les côtés et leur forme change selon les normes du pays.

Sous chaque rail, on place une semelle en caoutchouc qui joue le rôle de support, elle amortit les vibrations.

Dans les courbes serrées, on peut ajuster les butées pour augmenter l'écartement et mieux guider le train. Sur le chantier, les butées sont souvent de couleurs différentes pour faciliter leur distribution et leur mise en place.

- **Pour notre projet :** on utilise le systéme d'attaches **Vossloh**

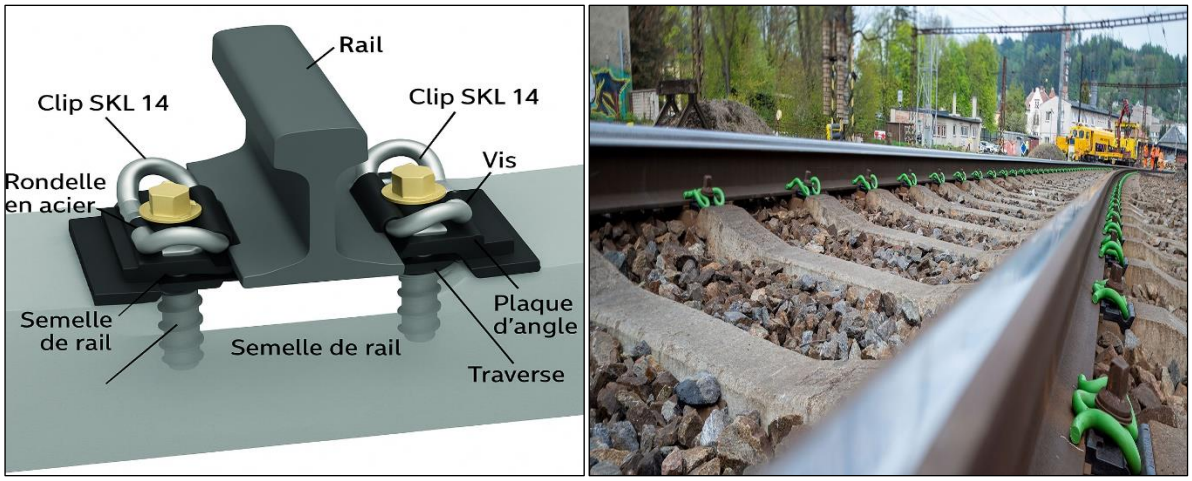


Figure -II-5 le système d'attache Vossloh

Cette ligne est conçue pour le transport marchandise et de supporter des charges lourdes de 32,5 tonnes par essieu, ce qui impose des exigences élevées en matière de stabilité et de durabilité des composants de la superstructure.

- Le système Vossloh est équipé de ressorts en acier à haute résistance qui assurent un maintien optimal des rails sous les sollicitations verticales et latérales.
- Il permet d'absorber les vibrations et les chocs générés par le passage de trains lourds, réduisant les efforts dynamiques transmis aux traverses et aux rails.
- Le système Vossloh présente une meilleure résistance aux effets thermiques (la zone est saharienne)

Ce choix technique vise à prolonger significativement la durée de vie de la voie en réduisant les besoins de maintenance et assurer la sécurité, la durabilité et l'adaptabilité du système Vossloh, notamment face aux contraintes climatiques et aux charges d'exploitation de la ligne.

II.2.4 Appareil de dilatation :

Lorsque les rails sont installés à des températures variables, ils se dilatent et peuvent se déformer. Par exemple, si la température extérieure dépasse 35 °C, celle des rails peut atteindre jusqu'à 55 °C, créant une hétérogénéité thermique qui compromet la stabilité de la voie. Il faut faire une homogénéisation thermique des longs rails soudés (LRS) afin d'obtenir un rail parfaitement aligné et assurer la continuité de la voie. Cette homogénéisation consiste à :

- Mesurer la variation du rail dû à la différence de température.
- Supprimer cette variation afin d'obtenir une température de pose uniforme sur toute la longueur.

➢ **Règles d'implantation** :

- Les appareils doivent être placés de préférence en alignement droit.
- Ils doivent être installés là où il n'y a pas de variation de pente.
- Une distance minimale de **300 mètres** entre deux appareils de dilatation.
- Les appareils de dilatation ne devront pas être sur un raccordement progressif.



Figure II-6 : appareil de dilatation

II.2.5 Appareil de voie :

Les appareils de voie permettent de créer des itinéraires dans les réseaux ferroviaires, ils organisent le trajet des trains et permettent aux trains de changer de voie. Isl Jouent un rôle essentiel dans la gestion des circulations dans les gares, les bifurcations et les zones de croisement. Ils se divisent en deux catégories :

➢ **Le branchement :** Un branchement est le moyen le plus simple de changer d'itinéraire d'une branche commun.

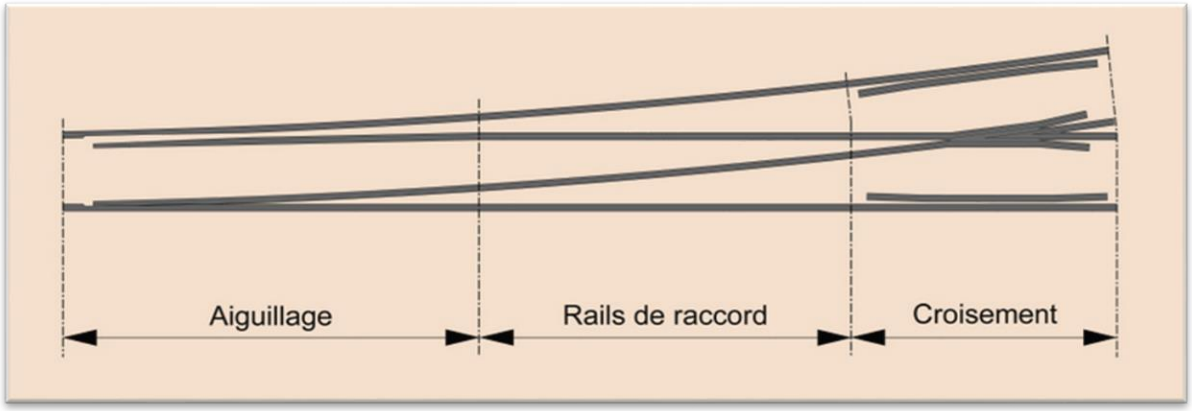


Figure II-7 : schéma d'un branchement simple

- **La traversée :** est le croisement de deux voies au même niveau. Elle peut être combinée avec un ou plusieurs branchements.

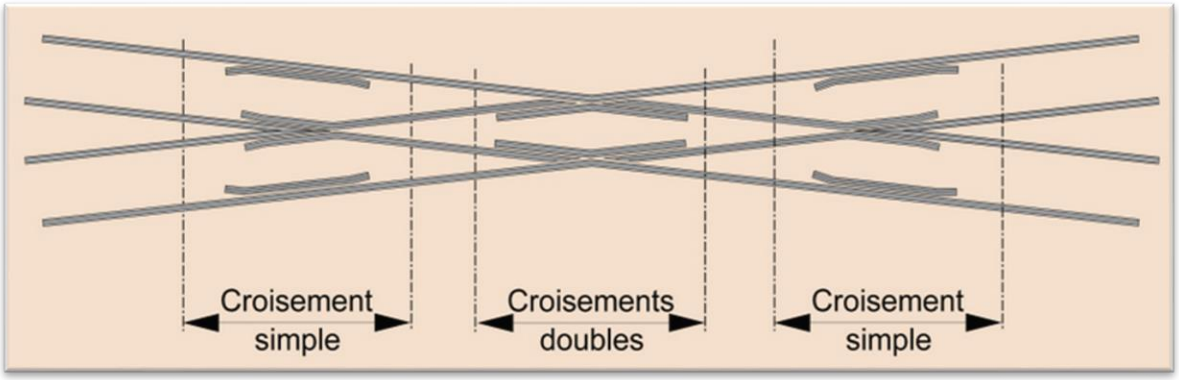


Figure II-8 : Schéma d'une traversé

L'implantation des appareils de voie doit respecter des exigences, que ce soit sur le tracé en plan ou en profil en long, lesquelles sont détaillées dans le chapitre sur la conception de la gare.

II.2.6 Ballast :

Le ballast est une couche de pierres concassées placée sous les traverses. Il assure la répartition des charges, la stabilité de la voie, le drainage des eaux et l'absorption des vibrations. Son épaisseur varie généralement entre 30 et 35 cm, selon les normes techniques.

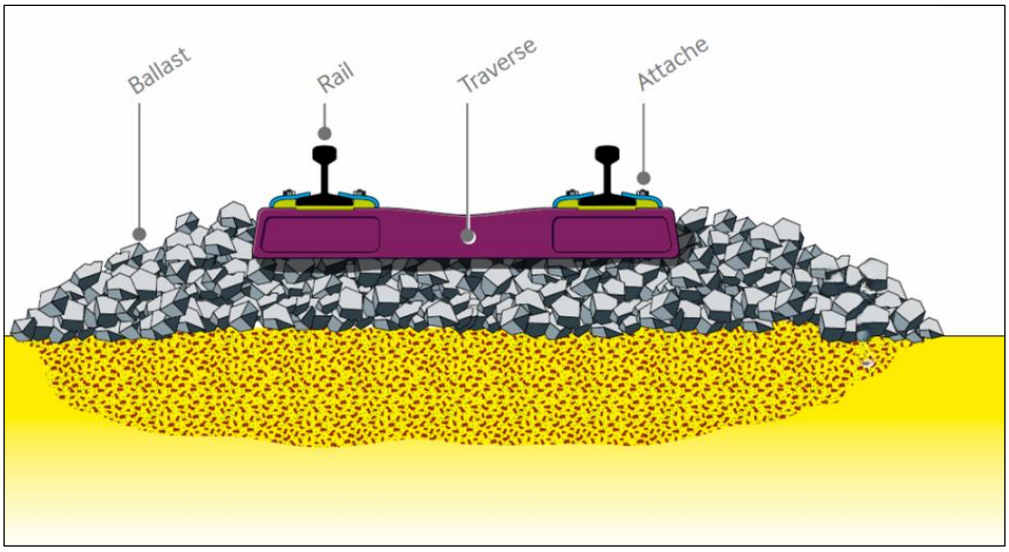


Figure II-9 la superstructure de la voie

II.3 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons vu les principaux éléments de la voie ferrée et le choix de ces composantes se base sur le tonnage, la vitesse et le trafic pour garantir une circulation efficace des trains, leur bon choix et leur implantation correcte sont essentiels pour assurer la durabilité.

TRACE EN PLAN

III. CHAPITRE III : TRACE EN PLAN

III.1 INTRODUCTION :

L'analyse géométrique d'un tracé ferroviaire est une étape essentielle pour assurer un comportement dynamique stable et performant du train roulant. Cette configuration idéale nécessite des paramètres géométriques fondamentaux telles que des lignes droites, des courbes douces et dévers, le tout en respectant des normes techniques précises, notamment le référentiel technique de la société National des transports ferroviaires (SNTF).

L'objectif est de choisir un tracé plus économique, réduisant au minimum les forces centrifuges et garantissant un roulement parfait et sécurisé des trains.

III.2 TRACE EN PLAN :

Le tracé en plan de la voie ferrée est la projection orthogonale de tous les points sur un plan horizontal. Il se compose d'une succession d'alignements droits et d'arcs de cercle, reliés entre eux par des courbes de raccordement progressif (clothoïde).

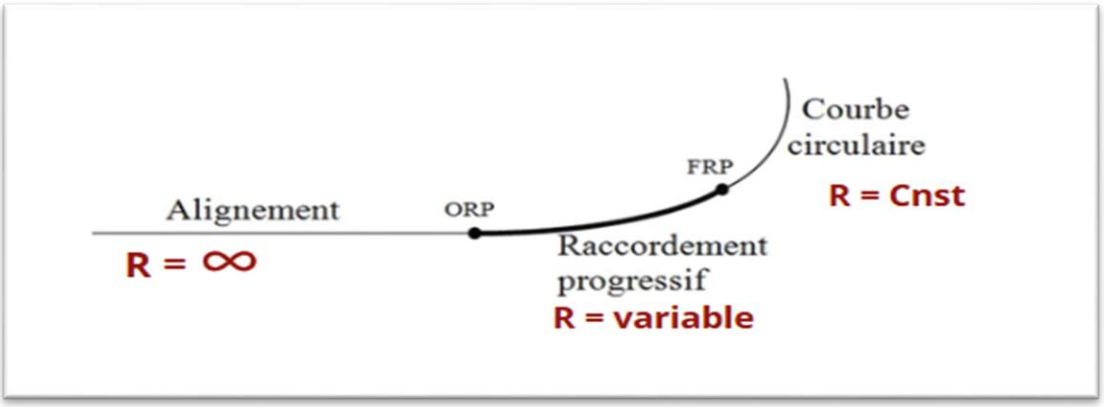


Figure III-1: les éléments de tracé en plan

III.3 LES CONDITIONS ET LES RÈGLES À RESPECTER DANS LE TRACE EN PLAN :

- Respecter les normes de la SNTF concernant les longueurs minimales des alignements et des courbes, ainsi que les rayons de courbure à respecter.
- Respecter le couloir des points topographiques déterminés lors de l'étude APD,
- Suivre les courbes de niveau afin de limiter les volumes de déblais et de remblais.
- Eviter au maximum les passages sur des terrains agricoles, des zones forestières et des propriétés privées.
- Prendre en compte la présence des réseaux électriques, gaziers et hydrauliques pour éviter toute interférence.
- Éviter les secteurs instables ou présentant des contraintes géotechniques majeures.

III.4 LES ÉLÉMENTS DU TRACE EN PLAN :

Un tracé en plan est constitué de trois éléments géométriques :

III.4.1 L'alignement :

C'est l'élément le plus simple et le plus favorable à l'exploitation, correspondant à une courbe de rayon infini, ou la force centrifuge devient négligeable. Il offre le meilleur tracé sur le plan technique pour la voie ferrée, et garantit un confort optimal pour les voyageurs, sans secousses.

III.4.2 Arc de cercle :

Lorsque la topographie du site ne permet pas de réaliser des alignements droits, il devient nécessaire d'utiliser des arcs de cercle: sections ou le rayon reste constant et doit être aussi grand que possible de sa valeur limite imposée par la vitesse de base.

III.4.3 La courbe de raccordement :

C'est l'élément géométrique qui garantit la transition fluide entre l'alignement droit et un arc de cercle. Sa courbure permet de passer progressivement d'un rayon infini à la fin de l'alignement, à un rayon constant au début de l'arc de cercle. La courbe de raccordement la plus utilisée est la clothoïde, on utilise ce type de raccordement afin de :

- Introduire progressivement le dévers.
- Concevoir un tracé esthétiquement satisfaisant.
- Respecter les conditions du confort et de sécurité.

L'emploi des courbes de raccordement se justifier par le calcul de la courbure Δc :

Tableau III-1 : valeurs de la courbure

Alignement-courbe	Deux courbes de mêmes sens avec R1 ≠ R2	Une courbe et contre courbe
$\Delta c = \frac{1000}{R}$	$\Delta c = \frac{1000}{R1} - \frac{1000}{R2}$	$\Delta c = \frac{1000}{R1} + \frac{1000}{R2}$

- Les courbes de raccordement sont recommandées lorsque : $\Delta c \geq \frac{2000}{V_{max}{}^2}$
- Les courbes de raccordement sont obligatoires lorsque :

Tableau III-2 : Limitation de la courbure

V< 100 km/h	V >100 km/h
$\Delta c \geq \frac{9000}{V_{max}{}^2}$	$\Delta c \geq \frac{7000}{V_{max}{}^2}$

✓ Dans notre tracé, la courbe de raccordement est obligatoire, car le rayon utilisé est maximal, soit 2000 m.

III.5 PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES :

Sur les voies mixtes, le tracé est caractérisé par :

- Vm : vitesse des marchandises (vitesse lente).
- Vv : vitesse des voyageurs (vitesse rapide).

Tableau III-3 : Vitesse des trains maximale

Vitesse voyageur	Vitesse marchandise
120 Km/h	70 Km/h

Les paramètres géométriques applicables selon la norme SNTF à la nouvelle ligne ferroviaire Bechar – gara Djebilet pour une vitesse maximale de 120 km/h sont les suivants :

III.5.1 Longueur minimum des éléments du tracé :

Pour amortir efficacement le roulis de la caisse des trains, il est nécessaire de respecter des longueurs minimales d'alignements, qui dépendent de la vitesse des trains et du type d'alignement concerné (alignements droits, courbes ou raccordements progressifs). Ces longueurs doivent être assez grandes pour permettre aux trains de rouler à des vitesses élevées en toute sécurité.

Tableau III-4 : Valeurs minimales des éléments de tracé selon SNTF[3]

Valeur limite normale(m)	Valeur limite exceptionnelle(m)
V/2=60	V/3=40

III.5.2 Rayon minimale :

Le rayon minimum d'une courbe est limité afin de garantir le confort des voyageurs et de réduire les efforts transversaux sur la voie. Il est défini en fonction de la vitesse maximale d'exploitation:

$$Rmin = \frac{11.8.V_{max}^2}{D_{max} + I_{max}}$$

- Rmin : Rayon minimum de courbe (m).
- Vmax : Vitesse des trains rapide (voyageurs) (km/h).
- Dmax : Dévers maximal (mm).
- Imax : Insuffisance de dévers maximum (mm).

III.5.3 Dévers :

C'est un élément essentiel dans les courbes ; il désigne la différence d'altitudes 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, et est destinée à compenser la force centrifuge ($\boldsymbol{Fc = \frac{m \times Vv^2}{R}}$), laquelle peut provoquer le déraillement en déportant le train vers l'extérieur de la courbe, et entraîner une fatigue prématurée de la voie. Le dévers est exprimé en $[mm]$.

Tableau III-5 : Valeurs limites du dévers (SNTF) [3]

Valeur limite normale(mm)	Valeur limite exceptionnelle(mm)
160	180

III.5.3.1 Dévers d'équilibre (théorique) :

Noté (Dth), le dévers qui compense totalement la force centrifuge permet d'assurer la stabilité du train et le confort des voyageurs lorsqu'un train se déplace à une vitesse constante V dans une courbe circulaire de rayon R. La formule utilisée pour calculer le dévers théorique est la suivante :

$$D_{th} = \frac{11.8.\,\mathrm{V}_{\max}^2}{\mathrm{R}}$$

- Dth : dévers théorique en (mm).
- Vmax : vitesse maximale de train en (Km/h).
- R : rayon de courbe en (m).

III.5.3.2 Dévers pratique (prescrit) :

Dans le cas d'une voie ferrée destinée à un trafic mixte, les trains circulent à des vitesses différentes selon leur type : les trains rapides (voyageurs) et les trains lents (marchandises). Cette variation de vitesse rend l'application du dévers théorique impossible. Cela conduit à la notion de dévers prescrit (ou dévers pratique/réel), qui répond aux objectifs suivants :

❖ <u>Éviter la fatigue de la voie :</u>

→ Lorsqu'un train rapide (voyageurs) roule sur une voie avec un dévers insuffisant, cela peut provoquer une surcharge sur le rail extérieur et causer une fatigue de la voie, il est donc nécessaire d'adopter un dévers suffisamment élevée pour compenser la force centrifuge.

→ Pour un train lent (marchandises), un dévers élevé peut provoquer une surcharge sur le rail intérieur, ce qui peut également endommager la voie. Il est donc nécessaire d'adopter un dévers plus faible.

❖ <u>Assurer la sécurité :</u>

→ Un train rapide circulant avec un dévers insuffisant présente un risque de déport vers l'extérieur de la courbe, augmentant ainsi le danger de sortie de voie.

→ Un train lent avec un dévers élevée présente des problèmes pour les trains lents et la fatigue de la voie.

❖ Assurer le confort des passagers : Le dévers pratique contribue au confort des passagers.
  - Donc pour atteindre ces objectifs il faut un compromis entre les besoins des trains lent et rapides. Donné par la formule :

$$dp = \frac{K}{R} = \frac{1000.C}{R}$$

- Dp : dévers pratique (mm).
- R : Rayon de courbe (m).
- K=1000×C : est le coefficient de la ligne.
- L

Sa valeur en général est comprise entre, celle des trains rapides et celle des trains lents, elle est donnée par :

$$0.5d_{th} \leq dp \leq 0.7d_{th}$$

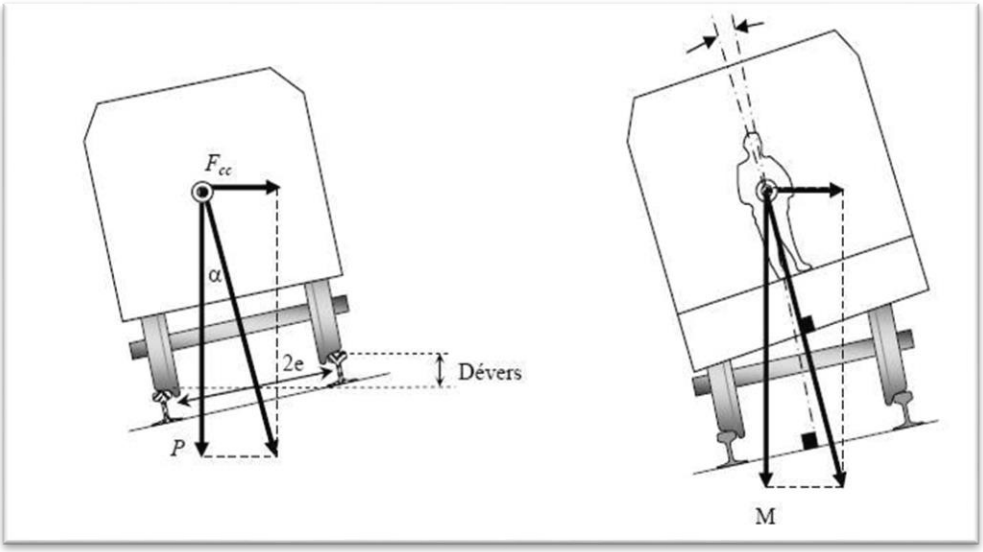


Figure III-2 : schéma de dévers pour un voie en courbe

III.5.3.3 Le coefficient de dévers :

Le coefficient de dévers reste constant sur une section de voie à trafic homogène. Il exprime la proportionnalité entre le dévers pratique (dp) et la courbure (1/R), de manière à assurer une conduite sure et confortable pour les trains. Sa formule est :

$$C=0.006\times V_{max}^2$$

III.5.3.4 Variation de dévers :

- **Variation de dévers en fonction de temps $\frac{dd}{dt}$:**

La variation du dévers dans le temps est limitée afin d'assurer une transition progressive entre les sections de voie, évitant ainsi les changements brusques d'inclinaison et garantissant la stabilité du train. Exprimée en $\left[\frac{mm}{s}\right]$, donnée par la formule suivante :

$$\frac{dd}{dt} = \frac{dp \times Vmax}{3{,}6 \times Lrp}$$

Tableau III-6 : Valeurs limites de la variation du dévers (SNTF) [3]

Valeur limite normale (mm/s)	Valeur limite exceptionnelle (mm/s)
50	60

- **Variation de dévers en fonction de la longueur $\frac{dd}{dl}$:**

La longueur des courbes de transition sera fonction du dévers adopté et du taux de variation de dévers admissible, donnée par la formule suivante :

$$\frac{dd}{dl} = \frac{dp}{Lrp}$$

Tableau III-7 : Valeurs limites de la variation du dévers (SNTF) [3]

Valeur limite normale (mm)	Valeur limite exceptionnelle (mm)
$\frac{180}{V}$ =1,50	$\frac{216}{V}$=1,80

III.5.3.5 Insuffisance de dévers :

Quand les trains rapides circulent dans une courbe à une vitesse plus élevée que la vitesse d'équilibre correspondant au dévers pratique, ces trains sont soumis à une force centrifuge non composée. Cela signifie que le dévers de la voie n'est pas suffisant et que la résultante des forces se déplace vers l'extérieur de courbe. On appelle ça l'insuffisance de dévers est la différence entre le dévers théorique requis pour les trains rapides et le dévers pratique, exprimé en mm.

$$I = Dth\,(V) - Dp = \frac{11.8 \times Vmax^2}{R} - Dp \leq I_{max}[mm].$$

Tableau III-8 : Valeurs limites de l'Insuffisance du dévers (SNTF) [3]

Valeur limite normale (mm)	Valeur limite exceptionnelle (mm)
150	160

III.5.3.6 Variation de l'insuffisance de dévers :

C'est le taux de changement de l'insuffisance de dévers en fonction du temps. Lorsqu'un train roule dans une courbe à une vitesse supérieure à la vitesse d'équilibre, l'insuffisance de dévers changes. Il est donc essentiel de limiter le taux de variation de cette insuffisance afin d'assurer le confort des passagers.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I \times Vmax}{3{,}6 \times Lrp}$$

Tableau III-9 : **Valeurs limites de la variation de l'insuffisance du dévers (SNTF)** [3]

Valeur limite normale (mm\s)	Valeur limite exceptionnelle (mm\s)
70	90

III.5.3.7 Excès de dévers :

Quand les trains marchandises (les minéraliers dans notre projet) circulent dans une courbe à une vitesse plus lente que la vitesse d'équilibre correspondant au dévers pratique, ces trains sont soumis à une force centripète non composée. Cela signifie que le dévers de la voie est excessif et que la résultante des forces se déplace vers l'intérieur la de courbe. On appelle ça l'excès de dévers, c'est la différence entre le dévers pratique et le dévers théorique requis pour les trains rapides. Exprimé en mm.

$$E = Dp - Dth\ (m) = Dp - \frac{11.8 \times \mathrm{Vmin}^2}{R} \leq E_{max}[mm]$$

Tableau III-10 : valeurs limites de l'excès du dévers (SNTF) [3]

Valeur limite normale (mm)	Valeur limite exceptionnelle (mm)
110 mm	130 mm

III.5.3.8 Longueur minimale de Raccordement progressif :

Elle dépend des caractéristique limite suivante :

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

Donner par la formule suivant par la norme (SNCF/IN 0272) on a :

$$Lrp = \frac{Dp \times Vmax}{3{,}6 \times \frac{dd}{dt}}$$

III.6 APPLICATION AU PROJET :

D'après les recommandations de la fiche UIC 703.R et SNTF avec une vitesse de 120 km/h, on a les données suivantes :

Tableau III-11 : valeurs limite géométrique de tracé

PARAMÈTRES	VALEUR LIMITE
Vitesse des trains rapides (voyageurs)	Vmax = 120 km/h
Vitesse des trains lents (marchandise)	Vmin = 70 km/h
Excès de dévers E	E = 110 mm
Insuffisance de dévers I	I = 150 mm
Dévers max	Dmax = 160 mm
Variation de dévers en fonction du temps	$\frac{dd}{dt} = 50$ mm/s
Variation de dévers en fonction de la longueur	$\frac{dd}{dl} = 1.50$
Variation de l'insuffisance de dévers en fonction du temps	$\frac{dI}{dt} = 75$ mm/s
Rayon minimal $Rmin = \frac{11.8.V_{max}^2}{D_{max}+I_{max}}$	548 m

✓ **Justification de choix des éléments de tracé :**

Sur notre tracé, s'étendant du PK 795+000 au PK 821+000, la dominante du transport est destinée par la circulation des trains lourds, avec une charge par essieu très élevée de 32.5 tonnes. Par conséquent, nous avons justifié afin de mieux répondre aux besoins spécifiques des trains de marchandises, cette justification concerne les points suivants :

- Un rayon de courbe minimum supérieur à 2000 m est généralement utilisé. L'utilisation de ce rayon améliore d'avantage le confort des passagers, notamment à une vitesse de 120 km/h, tout en réduisant l'usure des rails par les trains.
- Un dévers compris entre 25 et 30 mm est adopté pour minimiser l'excès de dévers (E), permettant aux trains lourds de circuler avec contact roue-rail sur la surface. Cela réduit l'usure des rails, prolonge leur durée de vie et diminue les couts de maintenance.

✓ **Exemple de calcul pour notre projet:**

Rayon du tracé R= 2000 m :

Dévers théorique:

→ Pour les trains voyageurs : dth = $\frac{(11.8\times120^2)}{R}$ = 85 mm

→ Pour les trains marchandise : dth = $\frac{(11.8\times70^2)}{R}$ = 30 mm

- Donc le dévers pratique est le dévers théorique pour les marchandise ($d_{adopté}$ =30 mm)

Condition pour raccordement progressif:

$\Delta c = \frac{1000}{R} = 0.50$

Pour notre cas la vitesse est inclue dans l'intervalle 100 < V ≤ 160 km/h donc:

$\Delta c > \frac{7000}{V^2}$ => 0.5 > 0.48

Donc RP obligatoire.

Vérification :

- Insuffisance de dévers : I = dth - dp = 85- 30 = 55 mm < 150 mm

- Excès de dévers : E = dp -($\frac{11.8\times V_{min}^2}{R}$) = 30 - 30 = 0 mm < 110 mm

Excès=0 pour diminuer l'usure de rail

Longueur de la clothoïde:

Lrp =$\frac{dp\times Vmax}{(\frac{dd}{dt}\times3.6)}$ = $\frac{30\times120}{(3.6\times50)}$ = 20 m on prend Lrp = 50m

Variation du dévers

→ <u>Variation par rapport au temps</u> :

$$\frac{dd}{dt} = \frac{dp \times Vmax}{3.6 \times Lrp} = 20\frac{mm}{s} < 50mm/s$$

→ <u>Variation par rapport à la longueur</u> :

$$\frac{dd}{dL} = \frac{25}{100} = 0.6\frac{mm}{m} < 1.125$$

→ <u>Variation d'insuffisance de dévers</u> :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I \times Vmax}{3.6 \times Lrp} = 36.64\frac{mm}{s} < 75$$

- On prend les mêmes calculs pour la totalité des autres rayons.

Tableau III-12 : Tableau récapitulatif des éléments de tracé en plan

Rayon (m)	Vitesse (Km/h)		Dth (mm)		Dp adopté	I (mm)	E (mm)	Lrp (m)	Lrp adopté (m)	$\frac{dd}{dL}$	$\frac{dd}{dt}$ (mm/s)	$\frac{dI}{dt}$ (mm/s)
	Vmax	Vmin	Voy	Mar								
2000	120	70	73.88	28.90	30	55	0	20	50	0.6	20	36.64
2000	120	70	73.88	28.90	30	55	0	20	50	0,6	20	36.64
2000	120	70	73.88	28.90	30	55	0	20	50	0.6	20	36.64

III.7 LES CONTRAINTES RENCONTRÉES :

Tableau III-13 : Tableau des contraintes rencontrées

PK	Contrainte	Solution
807+450	Ligne électrique MT	Déplacé
807+575	Fibre optique	Déplacé
807+624	Route RN50	Rétablissement par Passage inferieure
811+850	Ligne électrique MT	Déplacé
812+200	Ligne électrique MT	Déplacé
812+880	Ligne électrique MT	Déplacé
813+215	Piste	Supprimé ou déplacé
814+100	Oued	OV
816+800	Oued SEBTI EL FOUKANI	OV

III.8 CONCLUSION :

Le tracé en plan définit la géométrie horizontale de la voie ferrée à travers des alignements droits et courbes. Dans notre projet (PK 795 à PK 821), ce tracé a été réalisé en respectant rigoureusement les normes techniques de la SNTF et de l'UIC, en assurant la sécurité, le confort et les performances du trafic ferroviaire. Les paramètres tels que les rayons de courbure, le dévers, les longueurs minimales et la charge admissible (32,5 t/essieu) ont été calculés en prenant en compte la garantie d'un tracé conforme et fiable.

PROFIL EN LONG

IV. CHAPITRE IV: PROFIL EN LONG

IV.1 INTRODUCTION :

Le profil en long est un élément important dans les projets ferroviaires. Il fournit une vue détaillée du terrain le long du tracé, en représentant la projection horizontale de la cote de fil basse des rails sur un plan vertical passant par l'axe du tracé.

Le profil en long permet de déterminer le tracé optimal, réduisant les travaux de terrassement, les quantités des déblais et remblais ainsi que les ouvrages d'art. Cela facilite l'estimation des couts du projet et favorise une gestion plus efficace des ressources naturelles.

Il est composé d'une succession des lignes droites (rampes et pentes) reliée par des courbes circulaires. Pour chaque point du profil en long il est nécessaire de déterminer :

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

IV.2 RÈGLES À RESPECTER DANS LE TRACE DU PROFIL EN LONG :

Le tracé de la ligne rouge, correspond à la ligne projetée adoptée repose sur des critères précis et doit répondre à plusieurs exigences concernant le confort, la sécurité, la visibilité, l'évacuation des eaux pluviales et l'économie, c'est pourquoi il faut respecter certaines règles :

- Respecter les valeurs des paramètres géométriques ainsi que les rayons prescrits par la réglementation en vigueur.
- Adapter la ligne rouge au relief naturel afin de limiter les travaux de terrassement.
- Assurer une bonne coordination entre le tracé en plan et le profil en long.
- Éviter les hauteurs excessives de remblais.
- Minimiser les volumes de déblais et remblais.
- Aux changements de déclivité (rampe ou pente), raccorder les alignements droits par des courbes circulaires.
- Eviter une forte déclivité prolongée.
- Prévoir un raccordement optimal avec les réseaux ferroviaires existants.
- Éviter l'implantation des appareils de voie en courbe ou en pente.
- Éviter d'enchaîner immédiatement une courbe en profil en long après une courbe en plan.
- Réduire au maximum le recours aux ouvrages d'art.
- Garantir une évacuation efficace des eaux pluviales, notamment au niveau des points bas.
- Dans les zones inondables, il est impératif de concevoir un profil en remblai dont la hauteur dépasse le niveau des plus hautes eaux (NPHE) de **0,5 mètre** minimum.

IV.3 ÉLÉMENTS GÉOMÉTRIQUES DU PROFIL EN LONG :

IV.3.1 Les déclivités droites :

Les différentes sections du profil en long sont caractérisées par leur longueur et leur inclinaison, cette dernière étant définie en fonction de la direction de circulation.

- ✓ Pente : déclivité négative, correspondant à un tronçon de voie où l'altitude diminue dans le sens de la circulation.
- ✓ Rampe : déclivité positive, correspondant à une section où l'altitude augmente.
- ✓ Palier : déclivité nulle, correspondant à une section à hauteur constante, généralement au niveau des gares.

IV.3.2 Raccordements de déclivités :

Courbes verticales : Le raccordement entre les pentes et les rampes s'effectue au moyen de courbes verticales, généralement de forme circulaire ou parabolique, afin d'assurer une transition progressive et confortable du profil en long.

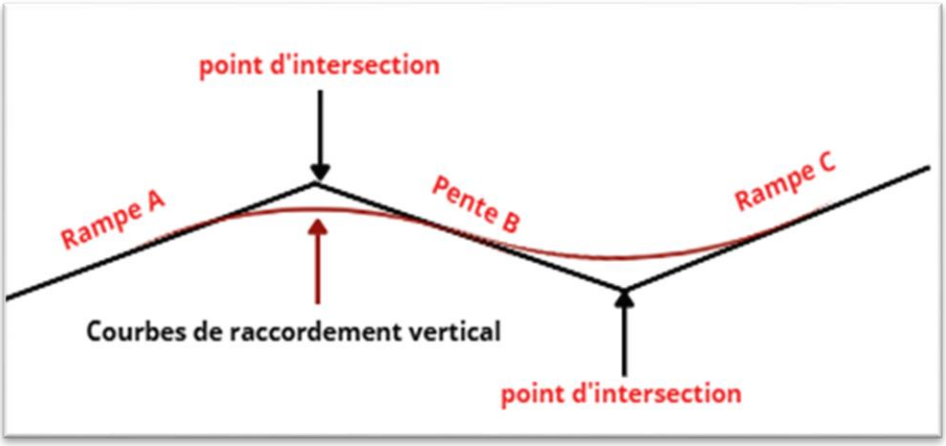


Figure IV-1 : les éléments de profil en long

IV.4 PARAMÈTRES DU TRACE À RESPECTER :

IV.4.1 La déclivité maximale :

De manière générale, les valeurs admissibles à ne pas dépasser sont fixées par la réglementation de la SNTF. Concernant notre ligne ferroviaire, le profil en long de cette ligne est soumis à des exigences spécifiques. Des trains minéraliers de 2 200 m de long, transportant une charge de 22100 tonnes, circulent huit fois par jour entre Gara Djebilet et Béchar, conformément au plan de transport, dans le sens chargé :

- Les rampes ne doivent pas dépasser 6-8 ‰
- Les pentes ne doivent pas dépasser 6-10 ‰

IV.4.2 Longueur minimale des déclivités :

Lorsqu'un train franchit deux déclivités successives de sens opposés, il peut subir des accélérations verticales brusques, engendrant d'importantes oscillations des trains. Cela peut entraîner un inconfort pour les passagers ainsi que des dommages potentiels aux rails. Pour éviter ces effets indésirables, les éléments du profil en long doivent respecter des longueurs minimales spécifiques.

Tableau IV-1 : Tableau des longueur minimale des déclivités(SNTF) [3]

Valeur limite normale(m)	Valeur limite exceptionnelle(m)
V/2=60	V/3=40

IV.4.3 Rayon admissible en raccordements de profil en long :

Pour assurer le confort et la sécurité, il est nécessaire de raccorder deux déclivités en profil en long par des courbes de raccordement. Les rayons minimaux autorisés pour ces raccordements circulaires

Tableau IV-2 : valeurs de rayon vertical minimal(SNTF) [3]

Valeur maximale normale	Valeur maximale exceptionnelle
$0.35\times V^2$ =5040m	$0.25\times V^2$=3600 m

IV.5 PARAMÈTRES DE PROFIL EN LONG :

Les paramètres de notre profil en long sont comme suit :

Tableau IV-3 : Paramètres du profil en long

Paramètres du profil en long	
La vitesse en (km/h)	120
Rayon vertical minimum de raccordement en profil (m)	5040
Longueurs minimales des déclivités en (m)	60
Pente maximale dans le sens chargé	8 ‰
Rampe maximale dans le sens chargé	6 ‰
Pente et Rampe dans les Gares	0 ‰

IV.6 CONCLUSION :

L'étude géométrique ferroviaire combine mathématiques et ingénierie pour définir précisément les alignements horizontaux et verticaux, les courbes, pentes et dévers, assurant ainsi la sécurité et l'efficacité du réseau. Elle utilise des outils modernes comme le GPS et des logiciels de CAO (Covadis, Civil 3D) pour optimiser les tracés et réduire les coûts de maintenance. Cette étude s'applique non seulement à la conception initiale, mais aussi à la gestion et au suivi tout au long du cycle de vie des voies, garantissant la durabilité et la fiabilité du transport ferroviaire.

Remarque : Trace en plan est présenté dans la planche N°01 PK803+000 au PK804+000

ÉTUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

V. CHAPITRE V : ÉTUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE :

V.1 INTRODUCTION :

L'Algérie, comme de nombreuses régions du monde, est exposée à des crues pouvant entraîner des conséquences graves, tant sur le plan humain que matériel. Ce phénomène naturel devient particulièrement préoccupant dans un contexte de développement accéléré : croissance démographique, urbanisation, extension des activités agricoles, industrielles et touristiques.

Le risque d'inondation résulte de la conjonction entre un aléa naturel — tel qu'un cours d'eau susceptible de déborder à la suite de fortes précipitations — et la présence d'enjeux vulnérables, notamment les populations, les infrastructures, les habitations ou encore les zones agricoles.

Dans le cadre de l'étude de la future ligne minière reliant Gara Djebilet (Tindouf) à Béchar, il est essentiel d'évaluer l'impact hydrologique du projet sur les écoulements des eaux pluviales interceptées par les sous-bassins versants traversés par le tracé. Cette analyse vise à déterminer les débits de crue associés aux principales périodes de retour, et à identifier les solutions d'aménagement hydraulique les plus appropriées pour limiter les risques et garantir la sécurité de l'ouvrage projeté.

V.2 MÉTHODE ET CRITÈRE DE CONCEPTION :

- Dans la mesure du possible, ne pas modifier la géométrie naturelle des cours d'eau.
- Calcul des caractéristiques physiques et géomorphologiques des bassins versants.
- Estimation des débits de crue pour un événement centennal (période de retour de 100 ans).
- Évaluation des débits de saturation selon les types d'ouvrages hydrauliques à prévoir.
- Dimensionnement des structures hydrauliques, longitudinales (profil en long) et transversales (profil en travers), en fonction des débits estimés.

V.3 ÉTUDE HYDROLOGIQUE :

L'hydrologie est une discipline clé dans les projets ferroviaires. Elle permet de comprendre les Propriétés de l'eau et son mouvement à la surface de la terre ainsi que dans les couches souterraines. Elle permet de délimiter les bassins versants afin de déterminer leurs caractéristiques et de calculer le débit de chacun.

V.3.1 DESCRIPTION HYDROGRAPHIQUE DE LA ZONE DE PROJET :

Le tronçon que nous étudions s'étend du PK 795+000 au PK 821+000, dans la wilaya de Tindouf, située dans le sud-ouest de l'Algérie. Dans cette section, plusieurs écoulements d'eau sont examinés, localisés dans un réseau hydrographique limité mais important pour la région. Le tracé de la voie traverse des écoulements majeurs, tels que les oueds Oum El Assel et Sebti El Fouqani, qui présentent une activité significative en période de crues et jouent le rôle de principaux exutoires lors des épisodes pluvieux. Il est également traversé par des écoulements secondaires, de moindre débit, qui peuvent néanmoins influencer localement le comportement hydrologique du site. Ces écoulements dirigent généralement vers des dispositions fermées appelés Sebkhas.

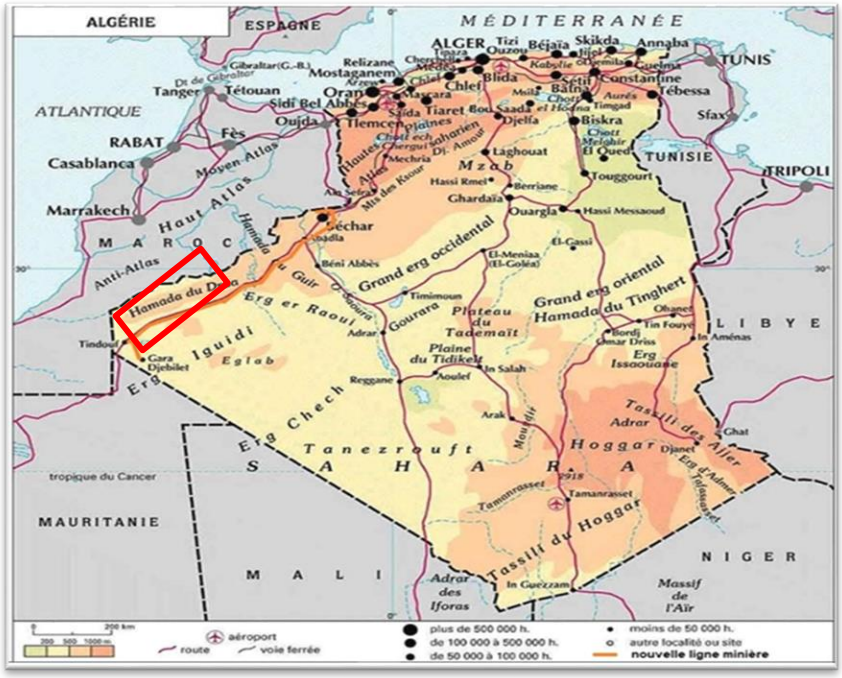


Figure V-1 : Localisation géographique de la zone d'étude

V.3.2 CARACTÉRISTIQUE CLIMATIQUE :

Le climat de la région de Tindouf est de régime désertique (subtropical désertique). Il est marqué par des étés chauds et secs au long de l'année et des hivers arides avec des nuits froides.

Les températures maximales sont supérieures à 45 °C en été et des températures minimales de 7°C en hiver.

V.3.2.1 La température :

La région de Tindouf se distingue par des températures moyennes généralement élevées. Selon le tableau n°1, la température maximale est observée au mois de juillet, où elle dépasse les 40 °C. À l'inverse, la température maximale est observée au mois de juillet, où elle dépasse les 40 °C. À l'inverse, le mois de janvier est le plus froid, avec des températures minimales atteignant 7 °C. La période la plus chaude de l'année s'étend sur quatre mois, de juin à septembre.

Tableau V-1 : Les températures mensuelles de la période entre (1992– 2020) [5]

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tmin	7	9	12	15	17	21	27	27	23	18	12	8
Tmoy	13.8	16.3	20.2	23.1	26.1	30.2	35.5	35	30.4	25.3	19.1	14.8
Tmax	21	24	28	31	35	39	44	43	38	32	26	22

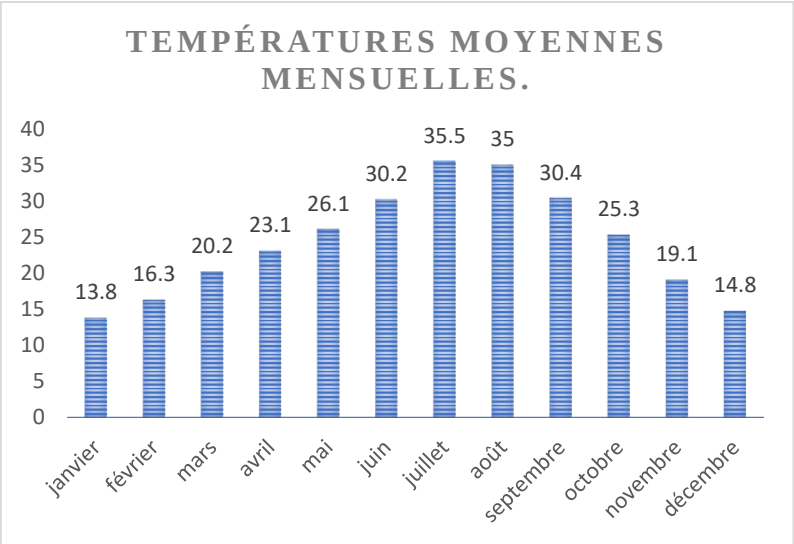


Figure V-2 : diagramme de variation des températures moyennes mensuelles.

V.3.2.2 Analyse des données pluviométriques :

Afin de protéger les lignes ferroviaires contre les dommages liés aux écoulements d'eau, il est indispensable de procéder une analyse des données pluviométriques disponibles. Cette étude sera réalisée à partir de la station de Tindouf, la plus proche du bassin versant de la zone étudiée.

L'analyse pluviométrique a été effectuée sur la base d'une collecte de données et de documents provenant de deux sources principales, à savoir :

- L'office National de la Météorologie (ONM).
- L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)

V.3.2.2.1 La pluie mensuelle :

Selon les données du tableau n° 02, les mois de mai, juin, juillet et août sont les plus secs, avec des précipitations inférieures à 1 mm. Les valeurs maximales de précipitations sont enregistrées en septembre et en novembre, atteignant près de 15 mm. De manière générale, les précipitations dans la région Tindouf restent faibles malgré des variations interannuelles parfois marquées, le climat de Tindouf reste globalement très sec et aride.

Tableau V-2 : Pluviométrie mensuelle moyenne de la période 1992-2020 [5]

Mois	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**Total**
Pluie	2	7	3	1	7	1	1	8	14	13	4	4	65

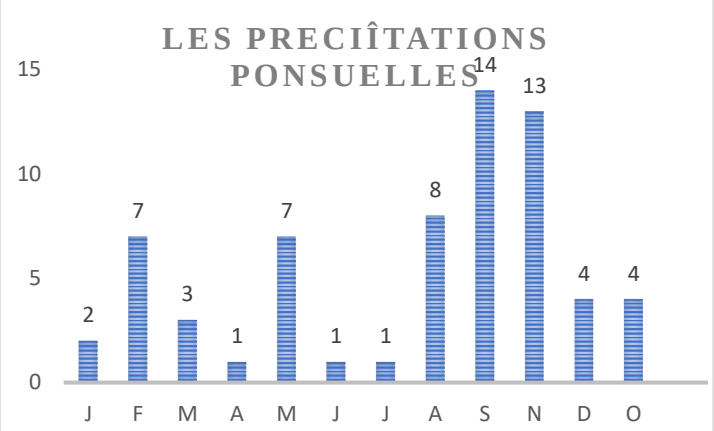


Figure V-3 : diagramme de pluviométrie mensuelle moyenne à Tindouf

V.3.2.2.2 La pluie annuelle :

La région Tindouf connaît une pluviométrie irrégulière, avec une saison des pluies qui s'étend d'août à mars, marquée par des précipitations importantes en août dues aux pluies tropicales.

Tableau V-3 : Données pluviométriques annuelle[5]

Station	Phase d'observation	Moyenne annuelle (mm)
Tindouf	1992-2022	50.5

V.3.2.2.3 Les pluies maximales journalières :

Les pluies maximales journalières de faible fréquence sont à l'origine de crues à débits importants, contre lesquelles il est nécessaire de protéger les différents ouvrages hydrauliques. Théoriquement, les valeurs extrêmes s'ajustent à une loi des valeurs extrêmes. En Algérie, il a été vérifié que les précipitations journalières maximales annuelles s'ajustent de manière satisfaisante à la loi de Gumbel.

Tableau V-4 : Pluies journalières maximales en mm

Période de routeur	F(x)	1-F(x)	U. Gumbel	Pjmax (mm)
10 ans	0.1	0.9	2.25	45.79
50 ans	0.02	0.98	3.902	70
100 ans	0.01	0.99	4	81.75

V.3.2.2.4 Les pluies de courte durée :

Les précipitations de courte durée sont décrites par la loi Intensité-Durée-Fréquence (IDF), représentée par une courbe exponentielle décroissante. Cette courbe est définie par deux coefficients, a et b, appelés paramètres de Montana. Cette relation est essentielle pour la détermination des débits de projet maximaux.

La relation Intensité - Durée – Fréquence (IDF) recherchée est de type :

$$I(t) = at^{-b}$$

- I(t) : intensité de la pluie en fonction de la durée t, exprimée en $[mm/min]$ ou $[mm/h]$;
- t : durée de l'averse, correspondant généralement au temps de concentration, exprimée en $[\min]$ ou en $[h]$;
- a et b : coefficients de Montana, spécifiques à la région et à la période de retour considérée.

➢ **Estimation des coefficients de Montana** :

Les coefficients de Montana varient en fonction des régions et de la période de retour. Dans notre zone d'étude, ces coefficients sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V-5 : Valeur du paramètre de Montana pour les différentes périodes de retour [5]

	Temps de retour				
Coefficient de Montana	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans
b	0,83	0,83	0,84	0,84	0,84
a	10,21	20,64	27,54	34,16	42,74

✓ Les intensités calculées sont donc les suivantes :

Tableau V-6 : valeur intensité - durée – Fréquence (IDF).

Temps(ans) / Durée (h)	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
24	1,5	1,9	2,4	3	3,44
48	0,8	1,1	1,3	1,7	1,92
72	0,6	0,8	1	1,2	1,32
96	0,5	0,6	0,7	0,9	1,05
120	0,4	0,5	0,6	0,8	0,89

V.3.2.3 Le vent :

La région de Tindouf, dans le sud-ouest de l'Algérie, se distingue par un climat désertique fortement influencé par le vent. Les vents dominants soufflent généralement de l'ouest durant la nuit et la matinée, puis du sud-ouest l'après-midi. La vitesse moyenne atteint environ 16 km/h, avec des rafales pouvant dépasser ponctuellement les 35 km/h. Ces vents, fréquents en période chaude, contribuent à atténuer la chaleur extrême, mais peuvent aussi provoquer des tempêtes de sable, réduisant la visibilité et impactant les conditions de vie locales.

V.3.3 BASSIN VERSANT :

Le bassin versant agit comme un collecteur en absorbant les précipitations. Il est défini comme la surface drainée par un cours d'eau et ses affluents en amont de la section considérée, appelée exutoire, située à l'intersection du tracé du bassin versant. Tout écoulement issu de cette surface doit traverser l'exutoire pour continuer son trajet vers l'aval.

V.3.3.1 La délimitation des bassins versants :

Les limites d'un bassin versant sont déterminées par les lignes de crête, qui suivent généralement les lignes de plus grande pente. À l'intérieur de chaque bassin, on considère le cours d'eau principal comme étant celui présentant la plus grande longueur ou s'écoulant selon la pente la plus faible.

Après avoir assemblé les différentes cartes topographiques à l'échelle 1/200 000 (cartes de l'état-major), le tracé de la future voie ferrée a été reporté sur ces documents. Cette étape est complétée par l'analyse d'images satellitaires, permettant de justifier et de préciser la délimitation des bassins versants traversés. Voir la figure V-4

V.3.3.2 Les caractéristiques morphologiques des bassins versants :

Après la délimitation des bassins versants, l'étape suivante consiste à déterminer le débit généré par chacun d'eux. Pour cela, plusieurs paramètres essentiels doivent être pris en compte dans la modélisation hydrologique des bassins, notamment :

- ✓ S (km²) : Superficie du bassin versant.
- ✓ P (km) : Périmètre du bassin.
- ✓ L (km) : Longueur du talweg principal.
- ✓ Hmax (m) : Altitude maximale du bassin.
- ✓ Hmin (m) : Altitude minimale du bassin.
- ✓ Hmoy (m) : Altitude moyenne, calculée selon la formule : **Hmoy =** $\frac{Hmax+Hmin}{2}$

À partir de ces données de base, d'autres paramètres hydrologiques peuvent être dérivés :

- ✓ Indice de compacité de Gravelius **(Kc) :** $\frac{0.28 \times P}{\sqrt{A}}$
- ✓ Pente moyenne **(I) :** $\frac{\Delta H}{L}$ **(m/m),** où ΔH = Hmax - Hmin
- ✓ Temps de concentration (Tc) : temps nécessaire pour que l'eau parcoure le bassin jusqu'à l'exutoire.

- ✓ Coefficient de ruissellement Cr : détermine la fraction des précipitations qui contribue à l'écoulement de surface.
- ✓ Vitesse moyenne de ruissellement (km/h) : estimation de la vitesse d'écoulement dans le bassin.

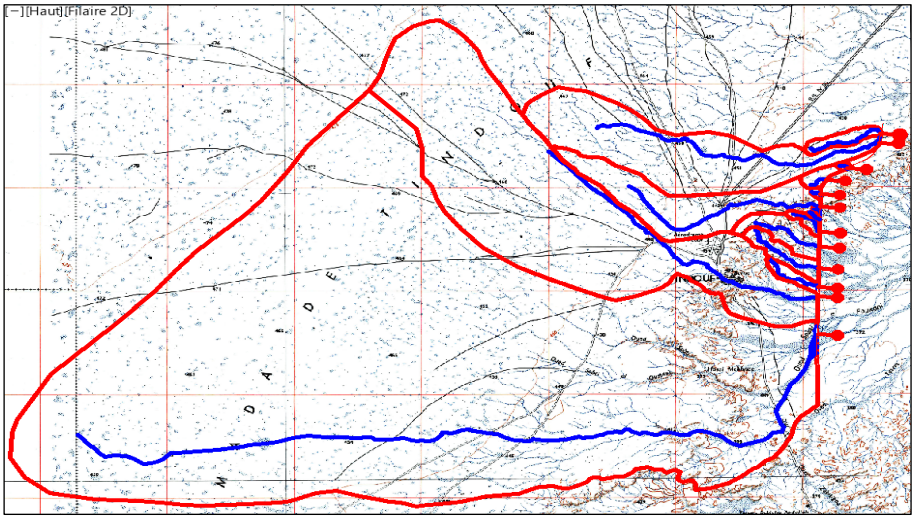


Figure V-4 Delimitation des BV sur la carte d'etat majort

→ **Les caractéristiques de nos bassins versants :**

Le tableau récapitulatif ci-dessous présente les principales caractéristiques morphométriques des bassins versants ainsi que des talwegs traversant le tracé de la voie ferrée, compris entre le PK 795+000 et le PK 821+000.

Tableau V-7 : Les caractéristiques morphologiques de no bassins versants

N° BV	Surface	Périmètre	H max	H min	Δ_H	Hmoy	L (km)	Pente TW (m/m)	Kc
01	6.8	14.3	442	420	22	431	6.72	0.003	1.53
02	122.78	65.6	472	419	53	445.5	25.31	0.002	1.66
03	0.60	2.977	435	421	14	428	0.70	0.020	1.08
04	3.98	8.979	440	423	17	431.5	1.15	0.015	1.26
05	0.708	3.534	438	425	13	431.5	0.87	0.015	1.18
06	64.86	52.018	468	396	72	432	18.38	0.004	1.81
07	0.05	0.94	422	399	23	410.5	0.27	0.086	1.18
08	0.16	2.19	433	399	34	416	0.78	0.043	1.55
09	0.08	1.362	434	400	34	417	0.60	0.057	1.38
10	0.03	0.9	427	399	28	413	0.33	0.084	1.43
11	0.039	0.87	419	395	24	407	0.31	0.076	1.22
12	0.07	1.159	415	396	19	405.5	0.30	0.063	1.21
13	0.36	3.14	435	399	36	417	1.06	0.034	1.47
14	2.90	8.407	438	386	52	412	3.02	0.017	1.38
15	14.89	28.15	445	377	68	411	6.08	0.011	2.04
16	10.70	18.29	440	375	65	407.5	6.98	0.009	1.57
17	4.95	11.48	425	375	50	400	5.53	0.009	1.45
18	340.27	104.55	481	371	110	426	27.62	0.004	1.59
19	1403.6	175.51	478	372	106	425	69.77	0.002	1.31

V.3.3.3 Calcule des débit des bassins :

L'estimation des débits de crue associés aux bassins versants naturels du projet dépend de plusieurs facteurs influençant plus ou moins fortement la genèse des crues, tels que la topographie, le climat, la morphologie des bassins, la nature géologique du sol, entre autres.

V.3.3.3.1 Calcule du temps de concentration T_c:

Le temps de concentration c'est le temps qu'il faut à une goutte d'eau, sans s'évaporer ni s'infiltrer, pour descendre du sommet du bassin versant jusqu'à l'exutoire. Le temps de concentration est calculé en utilisant les trois formules suivantes :

1) Formule de VENTURA (A <5 Km²) :

$$T_c = 0.1272\sqrt{\frac{A}{I}}$$

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

2) Formule de PASSINI (5Km²<A<25Km²) :

$$T_c = \frac{0.108(A \times L)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{I}}$$

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

3) Formule de GIANDOTTI (A>25Km²) :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{mox} - H_{min}}}$$

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

Tableau V-8 : Le Temps de concentration calculé avec les 3 méthodes

BV	Surface	Longueur	Pente	Tc (h)			TC> 0.15
	km²	Km	m\m	Giandotti	Passini	Ventura	
1	6.8	6.72	0.003	/	6.76	/	**6.76**
2	122.78	25.31	0.002	19.98	/	/	**19.98**
3	0.60	0.70	0.020	/	/	0.69	**0.69**
4	3.98	1.15	0.015	/	/	2.08	**2.08**
5	0.708	0.87	0.015	/	/	0.87	**0.87**
6	64.86	18.38	0.004	12.45	/	/	**12.45**
7	0.05	0.27	0.086	/	/	0.10	**0.15**
8	0.16	0.78	0.043	/	/	0.24	**0.24**
9	0.08	0.60	0.057	/	/	0.15	**0.15**
10	0.03	0.33	0.084	/	/	0.08	**0.08**
11	0.039	0.31	0.076	/	/	0.09	**0.09**
12	0.07	0.30	0.063	/	/	0.14	**0.14**
13	0.36	1.06	0.034	/	/	0.41	**0.41**
14	2.90	3.02	0.017	/	/	1.65	**1.65**
14	14.89	6.08	0.011	/	4.58	/	**4.58**
16	10.70	6.98	0.009	/	4.71	/	**4.71**
17	4.95	5.53	0.009	/	/	2.97	**2.97**
18	340.27	27.62	0.004	19.42	/	/	**19.42**
19	1403.6	69.77	0.002	43.70	/	/	**43.70**

V.3.3.3.2 Calcule du débit maximale (débit de crue) :

L'analyse des débits maximaux est essentielle pour évaluer les risques d'inondation et dimensionner correctement les structures.

- **Les formules utilisées** :

L'estimation des débits de projet est une opération délicate, car elle ne repose pas sur des règles exactes. Plusieurs méthodes empiriques peuvent être utilisées, mais elles donnent seulement une approximation de l'ampleur des crues. En l'absence de données hydrologiques précises, le recours à des formules empiriques devient nécessaire. Le choix de ces formules dépend principalement de la surface du bassin versant. Dans cette phase de l'étude APD, deux méthodes ont été retenues pour le calcul des débits des crues.

1) La Méthode Rationnelle :

Pour les bassins versant de surface inférieure à 10Km² :

$$Q = \frac{C_r \times p_{(Tc)} \times S}{Tc \times 3.6} = \frac{C_r \times I(T_c) \times S}{3.6}$$

- Q : Débit maximum de la crue de période de retour T en m3/s.
- Cr : Coefficient de ruissellement du bassin
- S : Taille du bassin en Km^2.
- $I(T_c)$: Intensité moyenne de la pluie maximale tombée sur une durée T et de période de retour T, en mm/heure.

$$I(T_c) = \left(\frac{P_{(Tc)}}{T_c}\right)$$

- $p_{(Tc)}$: Pluie correspondant au temps de concentration (m).

$$P(Tc) = P_{jmax}\left(\frac{Tc}{24}\right)^b$$

✓ Tc : Temps de concentration (en heure).

✓ b : Exposant climatique b=0.18.

V.3.3.3.3 Coefficient ruissellement :

Le coefficient de ruissellement C signifie le pourcentage des eaux écoulées sur la terre saturée de pluies par rapport à la quantité totale des eaux courantes, il dépend de :

- La couverture végétale
- La nature du sol.
- La pente du bassin versant.

La méthode recommandée de KENESSEY qui la somme de trois coefficients :

$$C_r = \sum_{C1}^{C3} Ci$$

Tableau V-9 : Coefficient C1 dépend de la pente du bassin versant

Pente	C1		
≤3.5%	0.01	0.03	0.05
Entre 3.5 et 11%	0.06	0.08	0.10
Entre 11 et 35%	0.12	0.16	0.20
>à 35%	0.22	0.26	0.30

Tableau V-10 : coefficient C2 dépend de la nature du sol (perméabilité)

Nature de sol	C2		
Imperméable	0.22	0.26	0.30
Peu perméable	0.10	0.15	0.20
Perméable	0.06	0.08	0.10
Très perméable	0.03	0.04	0.05

Tableau V-11 : coefficient de couverture végétale du bassin, versant

Couverture végétale	C3		
Rocheux	0.22	0.26	0.30
Prairie	0.17	0.21	0.25
Labours champs	0.07	0.11	0.15
Foret et territoire sableux	0.03	0.04	0.05

❖ **Variation de coefficient de ruissèlement C_T:**

$$C_T = \begin{cases} Si\ C_r = C_{10} < 0.8 \text{ alors } P_0 = \left(1 - \left(\frac{C_{10}}{0.8}\right)\right).P_{10} \\ \text{Si } C_{10} \geq 0.8 \text{ alors } P_0 = 0\ on\ admettra\ généralement : C_T = C_{10} \end{cases}$$

- Coefficient de ruissellement C(T) pour une période de retour T > 10 ans :

$$C_T = 0.8(1 - (\frac{P_0}{P_T})$$

Où :

- P_T: pluie journalière de période de retour T.
- P_0: rétention initiale.
- C_{10} : coefficient de ruissèlement calculé par la formule de Kenessey.

Donc, le coefficient de ruissellement pour les périodes de retour T10, T50 et T100 est :

Tableau V-12 : variation de coefficient de ruissellement

Période de retour	T10	T50	T100
C_T	0.30	0.47	0.51

2) La Formule de Mallet – Gautier :

Pour les bassins versant de surface supérieure à 10Km² :

$$Q_{max} = \frac{2 \times K \times \log(1 + A \times Pan) \times S \times \sqrt{(1 + 4 \times logT - logS)}}{\sqrt{L}}$$

- S : superficie du bassin versant (Km²).
- L : longueur du talweg principal (Km).
- K et A : coefficient qui dépend de la topographie du bassin versant, ils varient comme suit :

1<K<3

20<A<30

✓ En prend **K = 1.3** et **A = 25.**

- Pan : précipitation moyenne annuelle (m).
- T : période de retour en années.

V.3.4 Application pour notre projet :

❖ **Calcul pour le bassin versant 01 avec une période de retour de 100 ans :**

Nous avons : S=6,8 km², L=6.72 km, et I=0,0033 (m/m)

1) Calcule du temps de concentration T_c:

Nous avons un bassin de surface nous utilisons donc la formule de PASSINI :

$$T_c = \frac{0.108(A \times L)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{I}} = \frac{0.108(6.8 \times 6.72)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{0.0033}} = \mathbf{6.72\ h.}$$

2) Calcul des débits du bassin par les deux méthodes :

i.La méthode rationnelle :

$$Q = \frac{C_r \times p_{(Tc)} \times S}{Tc \times 3.6} = \frac{C_r \times I(T_c) \times S}{3.6}$$, avec : $P(Tc) = P_{jmax}\left(\frac{Tc}{24}\right)^b$

$$P(Tc) = 86.9\left(\frac{6.72}{24}\right)^{0.18} = 69.10 \text{ mm}$$

$$Q = \frac{0.51 \times 69.10 \times 6.8}{6.72 \times 3.6} = \mathbf{9.9\ m3/s}$$

ii.La méthode de Mallet-Gauthier :

$$\boldsymbol{Q_{max}} = \frac{2 \times \mathrm{K} \times \log\left(1 + \mathrm{A} \times \mathrm{Pan}\right) \times \mathrm{S} \times \sqrt{(1 + 4 \times \log\mathrm{T} - \log\mathrm{S})}}{\sqrt{\mathrm{L}}}$$

- K=1,3
- A=25
- Pan=0,505
- S=6,8 km^2
- L=6.72 km
- T=100 ans

$$\boldsymbol{Q_{max}} = \frac{2 \times 1.3 \times \log\left(1 + 25 \times 0.505\right) \times 6.8 \times \sqrt{(1 + 4 \times \log 100 - \log 6.8)}}{\sqrt{\mathrm{L}6.72}}$$

$$\boldsymbol{Q_{max}} \textbf{ = 6.91 m3/s}$$

Les résultats de calculs pour tous les bassins sont récapitulés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau V-13 : récapitulatif des paramètres hydrauliques des bassins versants pour les trois périodes de retour.

BV	Tc (h)	P(t) (mm)			I(t) (mm/h)		
		T10	T50	T100	T10	T50	T100
BV01	6,76	39,89	60,51	69,19	5,90	8,94	10,23
BV02	19,98	48,47	73,53	84,08	2,43	3,68	4,21
BV03	0,69	26,48	40,16	45,92	38,14	57,86	66,16
BV04	2,08	32,27	48,95	55,98	15,48	23,49	26,86
BV05	0,87	27,59	41,86	47,86	31,61	47,95	54,82
BV06	12,45	44,52	67,54	77,22	3,57	5,42	6,20
BV07	0,15	20,10	30,48	34,86	133,97	203,23	232,37
BV08	0,24	21,88	33,20	37,96	90,86	137,83	157,60
BV09	0,15	20,10	30,48	34,86	133,97	203,23	232,37
BV10	0,15	20,10	30,48	34,86	133,97	203,23	232,37
BV11	0,15	20,10	30,48	34,86	133,97	203,23	232,37
BV12	0,15	20,10	30,48	34,86	133,97	203,23	232,37
BV13	0,41	24,12	36,59	41,84	58,31	88,45	101,14
BV14	1,65	30,94	46,93	53,66	18,77	28,47	32,56
BV15	4,58	37,19	56,42	64,51	8,11	12,31	14,07
BV16	4,71	37,37	56,69	64,82	7,93	12,03	13,76
BV17	2,97	34,39	52,17	59,65	11,58	17,57	20,09
BV18	19,42	48,23	73,16	83,65	2,48	3,77	4,31
BV19	43,70	55,81	84,66	96,80	1,28	1,94	2,22

Tableau V-14 : Tableau récapitulatif des débits de crue pour les périodes de retour de 10 ans, 50 ans et 100 ans.

N°BV	Débit (m3/s)						
	Rationnelle			Mallet Gauthier			
	Q10	Q50	Q100	Q10	Q50	Q100	Q100 RETENU
BV01	3.36	7.99	9.94	4.96	6.42	6.95	**9.94**
BV02	24.82	59.04	73.44	38.39	53.75	59.15	**59.15**
BV03	1.90	4.52	5.62	1.51	1.87	2.00	**5.62**
BV04	5.13	12.20	15.18	7.17	9.16	9.90	**15.18**
BV05	1.86	4.44	5.52	1.59	1.98	2.12	**5.52**
BV06	19.32	45.96	57.17	24.91	34.12	37.40	**37.40**
BV07	0.56	1.34	1.66	0.23	0.27	0.29	**1.66**
BV08	1.18	2.81	3.50	0.39	0.48	0.51	**3.50**
BV09	0.85	2.02	2.51	0.22	0.27	0.29	**2.51**
BV10	0.35	0.84	1.05	0.13	0.15	0.16	**1.05**
BV11	0.44	1.05	1.30	0.16	0.20	0.21	**1.30**
BV12	0.81	1.92	2.38	0.30	0.36	0.39	**2.38**
BV13	1.75	4.15	5.16	0.75	0.92	0.99	**5.16**
BV14	4.53	10.78	13.41	3.27	4.16	4.49	**13.41**
BV15	10.07	23.95	29.79	10.89	14.33	15.58	**15.58**
BV16	7.07	16.82	20.92	7.44	9.71	10.54	**10.54**
BV17	4.77	11.36	14.12	4.02	5.17	5.59	**14.12**
BV18	70.42	167.50	208.36	93.79	136.96	151.82	**151.82**
BV19	149.37	355.30	441.96	210.88	334.03	374.80	**374.80**

V.4 ÉTUDE HYDRAULIQUE :

Dans l'étude hydraulique, un système opérationnel d'évacuation des eaux sera mis en place afin de garantir la stabilité de l'infrastructure ferroviaire. Ce dispositif vise à capter à la fois les eaux zénithales et celles provenant des nappes phréatiques. L'assainissement des plateformes comprend :

- Des ouvrages de collecte longitudinale ;
- Des ouvrages transversaux ;
- Des ouvrages de raccordement.

❖ **Remarque :** dans notre tronçon, les ouvrages hydrauliques ont été ajoutés à des endroits où il y a des points bas ou des petits talwegs visibles sur la carte satellite mais absents de la carte d'état-major (voir le tracé en plan et profil en long).

V.4.1 Les ouvrages transversaux :

V.4.1.1 Les buses :

Les buses sont des ouvrages hydrauliques transversaux de section circulaire, Leur diamètre ne dépasse généralement pas Ø = 1,50 m et un nombre maximum de 4 buses. Leur mise en place nécessite une fondation en béton armée rigide afin de garantir leur stabilité structurelle.

V.4.1.2 Les dalots :

Les dalots sont des ouvrages hydrauliques transversaux à section rectangulaire ou carrée, réalisés en béton armé. Leurs dimensions ont été déterminées en fonction du débit d'eau à évacuer, conformément aux résultats du dimensionnement hydraulique basé sur la formule de Manning-Strickler.

V.4.1.3 Les ponts et viaducs :

Ces ouvrages doivent être dimensionnés pour résister à des crues centennales, ce qui implique que leurs dimensions doivent satisfaire aux exigences hydrauliques correspondantes.

$$Q_{100} < Qs$$

- Q100 : Débit de crue centennal (débit d'apport) en m³/s.
- Qs : Débit de saturation de l'ouvrage en m³/s.

V.4.2 Dimensionnement des ouvrages transversaux :

La mise en œuvre d'ouvrages hydrauliques adaptés, conçus et réalisés conformément aux normes en vigueur, assurera le rétablissement des écoulements superficiels interrompus par l'infrastructure ferroviaire. Ces ouvrages seront dimensionnés pour faire face à un événement pluvieux de période de retour centennale.

➢ **Critère de dimensionnement à respecter :**

- L'ouvrage doit évacuer le débit de crue correspondant.
- Le régime de ruissèlement est gravitaire (régime fluvial). H >h critique tel que $h_{critique} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \times B^2}}$ pour assurer un écoulement fluvial.
- La hauteur d'eau correspondante à ce débit ne doit pas dépasser 80 % de la hauteur de l'ouvrage. (Selon la norme SNTF hydraulique drainage) ;
- La pente des ouvrages doit être limitée (Pente minimale I = 1 %) pour éviter des vitesses trop élevées.

Tableau V-15 : Liste des Ouvrages prédimensionnés

N° BV	PK	Débit de crue (Q100 RETENU) (m3/s)	Ouvrages projetés
BV01	799+225	9.94	Buse
BV02	796+387	59.15	Dalot
BV03	800+712	5.62	Buse
BV04	802+683	15.18	Dalot
BV05	804+250	5.52	Buse
BV06	805+350	37.40	Dalot
BV07	805+700	1.66	Buse
BV08	805+863	3.50	Buse
BV09	805+975	2.51	Buse
BV10	806+050	1.05	Buse
BV11	806+156	1.30	Buse
BV12	806+225	2.38	Buse
BV13	806+607	5.16	Buse
BV14	807+850	13.41	Dalot
BV15	809+287	15.58	Dalot
BV16	811+360	10.54	Dalot
BV17	813+275	14.12	Dalot
BV18	814+100	151.82	OV
BV19	816+922	374.80	OV

V.4.2.1 Le débit de saturation :

➢ **La méthode de MANNING STRICKLER :**

Le principe repose sur la vérification que le débit de crue centennale à évacuer ne dépasse pas la capacité hydraulique maximale de l'ouvrage tout au long de son fonctionnement. Cette condition est essentielle pour assurer la stabilité et la durabilité de l'infrastructure en cas d'événement pluvial exceptionnel. Ce débit maximal est déterminé par la section pleine (ou saturation) de l'ouvrage, qui peut être évaluée à l'aide de la relation de Manning- Strickler :

$$\boldsymbol{Q_s = \text{Ks} \times Sm \times Rh^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}} = \text{Vécoulement} \times Sm}$$

Avec : $\mathbf{Rh} = \frac{Sm}{Pm}$

Où :

- I : Pente longitudinale de l'ouvrage (m/m).
- Rh : Rayon hydraulique
- Sm : Section mouillée de l'ouvrage (b x Hu) (m2).
- b : Largeur de l'ouvrage (m).
- Hu : Hauteur utile (m).
- Pm : Périmètre mouillé en (m).
- H : Hauteur totale (m).
- Ks : Coefficient de rugosité ; Pour le béton Ks=70.

V.4.2.2 Vérification de condition d'auto curage :

Les conditions d'auto curage consistent à vérifier les vitesses d'écoulement pour les taux de remplissages de 1% et 10% des débits, afin d'assurer la durabilité des ouvrages (en vue de l'érosion des parois et la stagnation des eaux) :

- **Condition 1 :** La vitesse d'écoulement V > 1.00 m/s et ne dépasse pas 4.00 m/s.
- **Condition 2 :** pour Rq = Q /Qps = 0.1 il faut V >0.6 m/s.
- **Condition 3 :** pour Rq= Q/Qps = 0.01 il faut V >0.3 m/s.

V.4.2.3 Dimensionnement des dalots :

Les dimensions des dalots sont obtenues en écrivant légalité de débit des crues et le débit de saturation

$$\mathbf{Qs = Qmax}$$

→ Les calculs hydrauliques doivent être effectués pour un taux de remplissage de 80 %, soit une hauteur d'eau h = 0,8H.

→ Dans le cadre de notre projet, les dalots sont réalisés en béton, avec une rugosité hydraulique Ks = 70. **[6]**

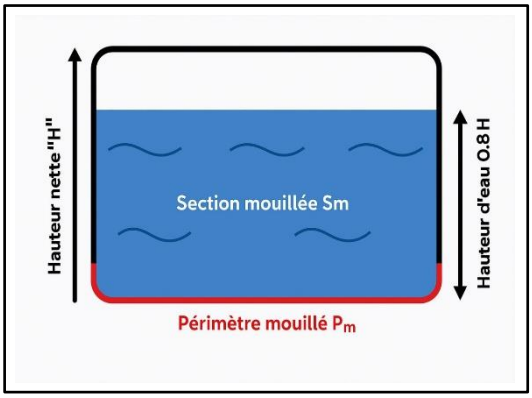


Figure V-5 : schéma de dalot

- Les dalots présentent les caractéristiques suivantes :
  - B : largeur intérieure nette du cadre (m)
  - H : hauteur intérieure nette (m)
  - 0,8H : hauteur de remplissage considérée (m)
  - Rh : rayon hydraulique (m)

→ En utilisant la formule de MANNING STRICKLER :

$$\mathbf{Qmax = Ks \times Sm \times Rh^{2/3} \times I^{1/2}}$$

Avec : $\mathbf{Sm = 0.8\times H \times B}$ et $\mathbf{Rh = \frac{Sm}{Pm} = \frac{0.8\times H\times B}{1.6\times(B\times H)}}$

D'où : $\mathbf{Qmax = 70 \times (0.8 \times H \times B) \times \left(\frac{0.8\times H\times B}{1.6\times(B\times H)}\right)^{2/3} \times I^{1/2}}$

✓ En isolant la hauteur H dans l'expression du débit, on parvient au calcul itératif suivant :

$$\mathbf{H=\left(\frac{Qmax}{Ks\times I^{\frac{1}{2}}}\right)^{3/5} \times \left(\frac{1.6\times(B\times H)}{0.8\times B}\right)^{2/5} \Rightarrow H = H_0 \times \frac{(1.6\times B\times H)^{2/5}}{0.8\times B}}$$

- Le critère d'arrêt $\boldsymbol{Hi+1 - Hi < 10-3}$.

❖ **<u>Application numérique :</u>**

Dans le tronçon étudié, un dalot a été prévu au niveau du bassin versant numéro 16 situé, correspondant à un débit de crue centennale $\boldsymbol{Q_{100}}$ **= 10.54** $\boldsymbol{m^3}$**/s.**

Pour ce dalot, on suppose une largeur de base B fixée à 2 m. La hauteur totale du dalot est ensuite déterminée par itérations. Cette méthode consiste à rechercher la hauteur de remplissage h qui vérifie l'égalité entre le débit calculé à l'aide de la formule de Manning-Strickler et le débit de transit requis.

On prend: **Ks =70 , I =1% , B = 3 m**

Après le calcul itératif de l'équation précédente on obtient : H = 1.65 m on prend **H = 2.00 m**, Donc les valeurs retenues pour cette section de dalot sont : **B = 3 m** ; **H = 2.00 m.**

Après avoir déterminé les dimensions optimales du dalot, nous obtenons les valeurs suivantes :

Sm = 4.8 $\boldsymbol{m^2}$**, Pm = 9.2 m, Rh = 0.522 m**

1) **Calcul débit de transition avec la formule de MANNING STRICKLER :**

Qs = Ks × Sm × $Rh^{2/3}$ × $I^{1/2}$ = 70 × 4.8 × $0.522^{2/3}$ × $0.01^{1/2}$ = 21.78 m^3/s.

→ Qs > Q_{100} =10.54 m^3/s ⇒ Vérifier.

2) **Vérification de vitesse de saturation** :

Vs = $\frac{Q_{100}}{Sm} = \frac{10.54}{4.8}$ = 2.195, donc : **Vs ≤ 4 m/s** ⇒ Vérifier

3) **Vérification des conditions pour assurer un écoulement fluvial**

$h_{critique} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \times B^2}} = \sqrt[3]{\frac{10.54^2}{9.8 \times 3^2}}$ = **0.148 m < H = 2 m/s** ⇒ Vérifier.

4) **Vérification des condition auto curage :**

➢ Calcul vitesse a plain section :

Qps = = Ks × Sm × $Rh^{2/3}$ × $I^{1/2}$ = 70 × 6 × $0.6^{2/3}$ × $0.01^{1/2}$ = **29.87 m^3/s**.

Avec Vps = $\frac{Qps}{Sm} = \frac{29.87}{6}$ = 4.98 m/s ⇒ **Vps = 4.98 m/s**

✓ **Condition 1 :** La vitesse d'écoulement V > 1.00 m/s.

Rq = $\frac{Qmax}{Qps} = \frac{10.54}{29.87}$ = 0.352 ⇒ V = Rv × Vps = 0.92 × 4.98 = 4.58 m/s ⇒ Vérifier.

✓ **Condition 2 : pour Rq = Q /Qps = 0.1 il faut Vécoulement >0.6 m/s.**

Rq = $\frac{Q}{Qps}$ = 0.1 et Rv = $\frac{V}{Vps}$ = 0.64 ⇒ V= 0.64× 4.89 = 3.12 > 0.6m/s ⇒ Vérifier.

✓ **Condition 3 : pour Rq= Q/Qps = 0.01 il faut Vécoulement >0.3 m/s.**

Rq = $\frac{Q}{Qps}$ = 0.01 et Rv = $\frac{V}{Vps}$ = 0.32 ⇒ V= 0.32× 4.89 = 1.56 > 0.3m/s ⇒ Vérifier.

Avec même méthode de calcul en détermine les ouvrages hydrauliques transversaux adaptés pour chaque bassin.

Tableau V-16- Tableau récapitulatif des dimensions des dalots avec les vérifications des conditions d'auto-curage

Bassin	04	06	14	15	16	17
PK	802+683	805+350	807+850	809+287	811+360	813+275
$Q_{max\ (100ans)}\ (m^3/s)$	15,18	37.40	13.41	15.58	10.54	14.12
Rugosité Ks	70	70	70	70	70	70
Pente (m/m)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Nombre dalot	2	3	2	2	1	2
Dimensions obtenue BxH (mxm)	3.00 x 2.00	3.00 x 2.00	3.00 x 2.00	3.00 x 2.00	3.00 x 2.00	3.00 x 2.00
$Q_{saturation}(m3/s)$	43.55	65.33	43.55	43.55	21.78	43.55
$V_{saturation}(m/s) < 4\ m/s$	1.58	2.6	1.4	1.62	2.19	1.47
Q_{ps}	59.76	89.63	59.76	59.76	29.88	59.76
V_{ps}	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98
$R_q = Q/Q_{ps}$	0.252	0.417	0.224	0.261	0.353	0.236
$R_V = V/V_{ps}$ (ANNEXE-B -)	0,93	0,94	0,80	0.86	0.92	0.82
$V > 0.3\ m/s$	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59
$V > 0.6\ m/s$	3.18	3.18	3.18	3.18	3.18	3.18
Vérification	Vérifier	Vérifier	Vérifier	Vérifier	Vérifier	Vérifier

V.4.2.4 Dimensionnement des buses :

La formule de Manning Strickler à la saturation est utilisée pour le calcul hydraulique des ouvertures circulaires (buses) **[6]** ;

Sachant que : $Qs = Q_{max}$

Avec : $\mathbf{Sm} = \frac{\pi D^2}{4}$; $\mathbf{Rh} = \frac{D}{4}$

D'ou : $\mathbf{D} = 4^{5/8} \times \left(\frac{Qmax}{Ks \times \pi \times \sqrt{I}}\right)^{3/8}$

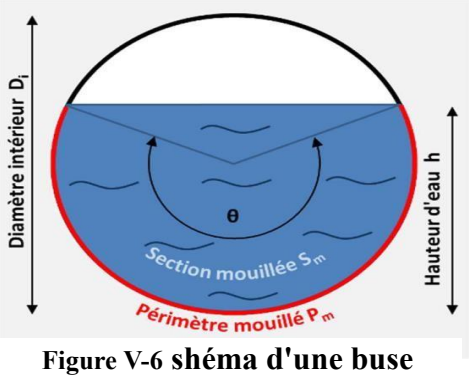


Figure V-6 shéma d'une buse

❖ **Application numérique :**

On prend l'écoulement au Pk 806+225 qui corresponde à **BV12** dont le débit **Qmax = 2.38 $m3/s$.**

Avec : **Ks = 70 ; I = 0.01**

$$\mathbf{D = 4^{5/8} \times \left(\frac{Qmax}{Ks \times \pi \times \sqrt{I}}\right)^{3/8} = 4^{5/8} \times \left(\frac{2.38}{70 \times \pi \times \sqrt{0.01}}\right)^{3/8} = 1.0331\ m}$$

On choisit un diamètre commercial de **1.50 m.**

✓ **Vérification des condition auto curage :**

➢ Calcul vitesse a plain section :

Qps = = Ks × Sm × $Rh^{2/3}$ × $I^{1/2}$ = 70 × 1.77 × $0.375^{2/3}$ × $0.01^{1/2}$ = **6.443 m^3/s**.

Avec Vps = $\frac{Qps}{Sm} = \frac{6.443}{1.77}$ = 3.64 m/s ⇒ **Vps = 3.64 m/s**

✓ **Condition 1 :** La vitesse d'écoulement V > 1.00 m/s.

Rq = $\frac{Qmax}{Qps} = \frac{2.38}{6.443}$ = 0.368 ⇒ V = Rv × Vps = 0.92 × 3.64 = 3.35 m/s ⇒ Vérifier.

✓ **Condition 2 : pour Rq = Q /Qps = 0.1 il faut Vécoulement >0.6 m/s.**

Rq = $\frac{Q}{Qps}$ = 0.1 et Rv = $\frac{V}{Vps}$ = 0.64 ⇒ V= 0.64× 3.64 = 2.33> 0.6m/s ⇒ Vérifier.

✓ **Condition 3 : pour Rq= Q/Qps = 0.01 il faut Vécoulement >0.3 m/s.**

Rq = $\frac{Q}{Qps}$ = 0.01 et Rv = $\frac{V}{Vps}$ = 0.32 ⇒ V= 0.32× 3.64 = 1.16 > 0.3m/s ⇒ Vérifier.

Avec même méthode de calcul en détermine les ouvrages hydrauliques transversaux adaptés pour chaque bassin.

Tableau V-17 Tableau récapitulatif des dimensions des dalots avec les vérifications des conditions d'auto-curage

Bassin	**01**	**03**	**05**	**07**	**08**	**09**	**10**	**11**	**12**	**13**
PK	799+225	800+712	804+250	805+700	805+863	805+975	806+050	806+156	806+225	806+607
Q_{max} (**100**ans)	9.94	5.62	5.52	1.66	3.5	2.51	1.05	1.3	2.38	5.16
Rugosité Ks	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Pente (m/m)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Nombre B	3	2	2	1	2	4	1	1	1	1
Diamètre théorique	1.77	2.2	2.18	1.39	1.84	1.62	1.17	1.27	1.59	2.13
Diamètre retenu	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
V_{ps}	2.39	1.83	1.83	1.15	1.83	1.15	1.15	1.15	1.15	1.83
Q_{ps}	38.06	12.91	12.91	2.03	12.91	2.03	2.03	2.03	2.03	12.91
$R_q = Q/Q_{ps}$ **(Annexe-B-)**	0.261	0.435	0.428	0.816	0.217	1.235	0.516	0.639	1.171	0.4
$1\ m/s < V < 4\ m/s$	1.08	1.75	1.75	1.28	0.82	1.15	1.15	1.12	1.15	1.72
$V > 0.6\ m/s$	1.53	1.17	1.53	0.73	1.17	0.73	0.73	0.73	0.73	1.17
$V > 0.3\ m/s$	0.77	0.58	0.58	0.37	0.58	0.37	0.37	0.37	0.37	0.58
Vérification	Vérifier	Vérifier	Vérifier	Vérifier	Vérifier	Vérifier	Vérifier	Vérifier	Vérifier	Vérifier

Tableau V-18 Liste globale des ouvrages projetés.

N° BV	PK	Ouvrage projeté	Dimensions
1	799+225	Buse	3 Φ1500
2	796+387	Dalot	5×(3.00×2.00)
3	800+712	Buse	2 Φ1500
4	802+683	Dalot	2×(3.00 x 2.00)
5	804+250	Dalot	4 ×(3.00 x 2.00)
6	805+350		
7	805+700	Buse	Φ1500
8	805+863	Buse	2 Φ1500
9	805+975	Buse	Φ1500
10	806+050	Buse	Φ1500
11	806+156	Buse	Φ1500
12	806+225	Buse	Φ1500
13	806+607	Buse	2 Φ1500
14	807+850	Dalot	2×(3.00 x 2.00)
15	809+287	Dalot	2×(3.00 x 2.00)
16	811+360	Dalot	(3.00 x 2.00)
17	813+275	Dalot	2×(3.00 x 2.00)
18	814+100	Pont rail	210m
19	816+922	Pont rail	455m

- **Cas particulier de notre tronçon:**

À la suite du tracé du profil en long, le projet impose un passage en déblai au niveau du bassin versant N°5. Cette situation empêche l'écoulement naturel des eaux de ce bassin, ce qui a nécessité la mise en place d'un canal joue un rôle d'un fossé de crêt pour dévier son débit vers le bassin versant N°6.

En conséquence, le dimensionnement du dalot du bassin versant N°6 a été ajusté en augmentant le nombre de cellules afin de pouvoir évacuer efficacement les débits combinés des deux bassins versants (N°5 et N°6).

→ **Dimensionnement de canal trapézoïdale :**

Pour le dimensionnement de fossés, on utilise la formule de Manning-Strickler:

$$\mathbf{Qs}= Ks \times Sm \times \sqrt{I} \times Rh^{2/3}$$

Le débit du canal doit être dimensionné de manière à assurer la condition :

$$Q100<Qs$$

b	h	S_m (m^2)	P_m (m)	R_h	Ks	I (m/m)	Q_s (m^3/s)
1m	**1m**	1.11	3.012	0.513	70	0.02	5.637

Tel que le débit de BV N°05 est : Q100=5.52m3

La condition d'évacuation est donc vérifiée pour canal trapézoïdale ayant une largeur de 1m une hauteur de 1 m et une pente de 1/1.

V.4.3 Dimensionnement des ouvrages longitudinaux :

Le drainage longitudinal joue un rôle essentiel dans la collecte et l'évacuation des eaux en provenance des talus et des pentes environnantes vers la plateforme de la voie. Ce système repose sur des fossés aménagés à un niveau approprié, destinés à canaliser les eaux vers les ouvrages hydrauliques prévus ou vers les lignes d'eau existantes. Pour identifier les surfaces à drainer, une analyse approfondie a été réalisée en s'appuyant sur les profils en travers du projet ainsi que sur les caractéristiques du terrain naturel.

V.4.3.1 Dimensionnement des fossés :

Pour le dimensionnement des fossés, on utilise la formule de Manning-Strickler :

Formule	Paramètres
Qs= $Ks \times Sm \times \sqrt{I} \times Rh^{2/3}$	Formule de débit dans un fossé.
$\boldsymbol{Ks}$	Coefficient de rugosité (Ks = 70 pour fossé revêtu en béton grossier).
$\boldsymbol{Sm}$ = (b + z × h) × h	Section mouillée du fossé.
$\boldsymbol{Pm}$ = b + 2h × √(1 + z²)	Périmètre mouillé du fossé.
$\boldsymbol{Rh} = \boldsymbol{Sm} / \boldsymbol{Pm}$	Rayon hydraulique.
z	Pente des berges (rapport horizontal/vertical).

- La déclivité longitudinale des fossés en zone de déblai est identique à celle du profil en long de la voie.
- Un profil trapézoïdal avec une pente de talus (H/V) 1/1.
- Le calcul des débits se fait dans le cas le plus défavorable, où il y a un remblai ou un déblai qui s'étend sur une grande longueur avec une hauteur importante
- Le débit à évacuer qui est la somme des 3 débits, la plate-forme, les bermes et les talus :

$$Qa = Qpf + Qt + Qb$$

La formule	Les paramètres
Q = 0.278 × C × I × A	**Q :** Débit de crue correspondant au bassin versant, avec une période de retour T (m³/s). **C :** Coefficient de ruissellement. **I :** Intensité de pluie (mm/h). **A :** Surface du bassin versant considéré : la plateforme / le talus/ bermes (km²).

- Chaque débit est déterminé en utilisant la méthode rationnelle.

Les dimensions retenues pour les fossés sont celles qui répondent à la condition suivante :

Qa < Qs

V.4.3.1.1 Application sur le Projet :

- **Berme :** 2 m
- **Largeur de la plate-forme :** 6.7 m

		Cas deblai
	Le cas plus défavorable	Longueur = 2586.25 m Hmax de deblai=21.47 m Largeur de la plateforme = 6.7 m
Plate-forme	**Cr**	0.9
	P (m/m)	0.04
	A (Km²)	0.0173
	Tc (h)	0.082
	I (mm/h)	219
	Débit Qpf (m³/s)	**0.7**
Talus	**Cr**	0.7
	P (m/m)	1/3
	A (Km²)	0.0127
	Tc (h)	0.025
	I (mm/h)	582
	Débit Qt (m³/s)	**1.50**
Berme	**Cr**	0.4
	P(m/m)	0.04
	A(Km²)	0.00517
	Tc(h)	0.046
	I(mm/h)	360
	Débit Qb(m³/s)	**0.40**
Débit total Qa	**Qpf+ Qt+ Qb**	**2.6**

✓ **Remarque :**

Notre plateforme est disposée sous forme de toit avec une largeur à de 6.7m à gauche et 1.3m à droite (pour future dédoublement).

b	h	S_m (m^2)	P_m (m)	R_h	Ks	I (m/m)	Q_s (m^3/s)
0.5	**0.5**	0.625	2.08	0.3	70	0.02	2.77

En conclusion, les types des fossés adoptés pour notre projet de forme trapézoïdal h=0.5m, b=0.5m Pente= (1/1)

NB: Le système de drainage longitudinal a été dimensionné pour une période de retour de 10 ans.

V.5 ZONE INONDABLE

Le tronçon étudié présente une contrainte géotechnique significative, caractérisée par un relief globalement plat, marqué par des dépressions peu prononcées, notamment entre les PK 799+150 et PK 799+360, ainsi qu'entre les PK 813+325 et PK 820+675. Cette morphologie indique la présence probable d'une zone inondable.

Dans de telles zones, la mise en œuvre d'un profil en remblais s'impose, avec une hauteur minimale strictement supérieure NPHE + 0,50 m, afin de garantir la stabilité de la plateforme et la sécurité de l'infrastructure ferroviaire

Section Zone inondable	Niveau NPHE/TN
DU PK 799+150 et PK 799+360, DU PK 813+325 et PK 820+675	1.2 m

Ce constat appelle à la mise en œuvre des mesures suivantes :

- Imposer un passage en profil de remblai.
- Prévoir l'installation de buses d'équilibre.
- Utiliser un matériau drainant $20\ mm \leq D \leq\ 63\ mm$

La zone de contact entre le matériau drainant et le remblai nécessite la mise en place d'un géotextile de séparation afin d'éviter le mélange des matériaux.

V.6 CONCLUSION :

Ce chapitre a permis d'évaluer les bassins versants et de dimensionner les ouvrages hydrauliques afin de prévenir les inondations. Cette démarche garantit la stabilité de la voie ferrée tout en réduisant l'impact environnemental.

ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

VI. CHAPITRE VI: ÉTUDE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE :

VI.1 INTRODUCTION :

L'étude géotechnique et géologique a pour but d'évaluer les propriétés physiques, mécaniques et hydrogéologiques du sol, de la roche et des formations géologiques susceptibles d'être rencontrées durant les phases de construction et d'exploitation. Elle repose sur des investigations de terrain, des essais en laboratoire et une analyse détaillée des données recueillies, afin de caractériser les matériaux en place. Les informations obtenues permettent d'estimer la capacité portante du sol, sa perméabilité, sa sensibilité à l'érosion, ainsi que d'autres paramètres essentiels pour la conception des fondations, remblais, talus et autres structures liées au projet ferroviaire. Une connaissance approfondie de ces aspects est indispensable pour garantir la stabilité, la durabilité et la sécurité des infrastructures projetées.

VI.2 ÉTUDE GÉOLOGIQUE :

VI.2.1 Situation géographique :

Le projet ferroviaire Béchar – Gara Djebilet se situe au sud-ouest de l'Algérie, traversant principalement la wilaya de Tindouf. Cette région est délimitée au nord par le Maroc, à l'ouest par le Sahara occidental, au sud par la Mauritanie, et à l'est par les wilayas d'Adrar et Bécha. La zone d'étude concernée par ce projet s'étend du PK 795+000 jusqu'au PK 821+000, dans la wilaya de Tindouf.

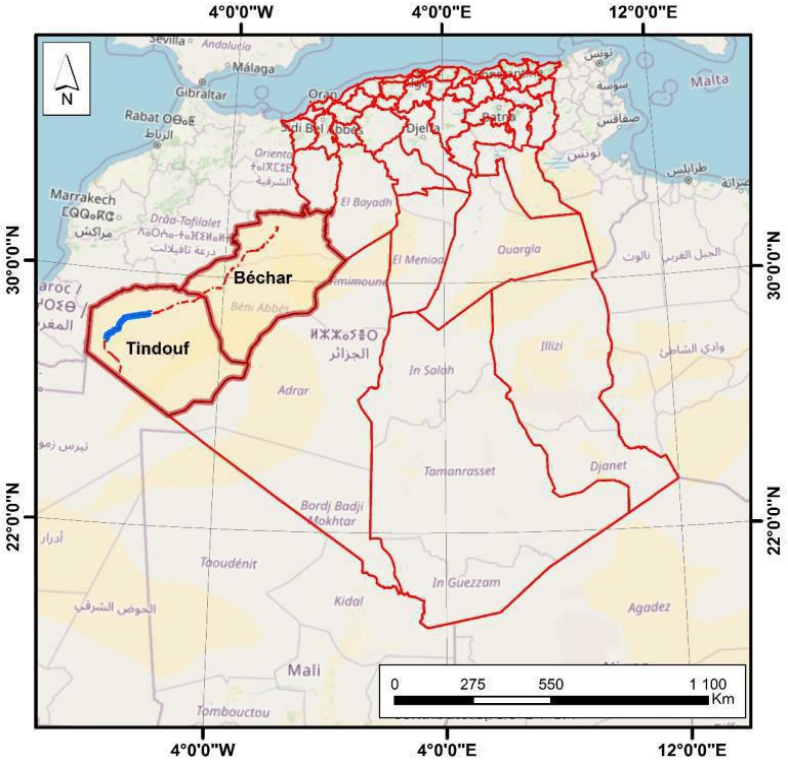


Figure VI-1 : Situation administrative du projet Béchar – Tindouf entre le PK 640+000 au PK 8 30+000.

VI.2.2 Formes géomorphologiques :

Entre le **PK 795+000 et le PK 821+000**, le tracé du projet ferroviaire Béchar – Tindouf traverse une zone aux formes géomorphologiques variées, incluant le djebel Ouarkziz (massif calcaire en cuesta), la **Hamada de Tindouf** (plateau désertique tabulaire), ainsi que plusieurs **sebkhas** comme celles de Tindouf et d'Ain Belbela.

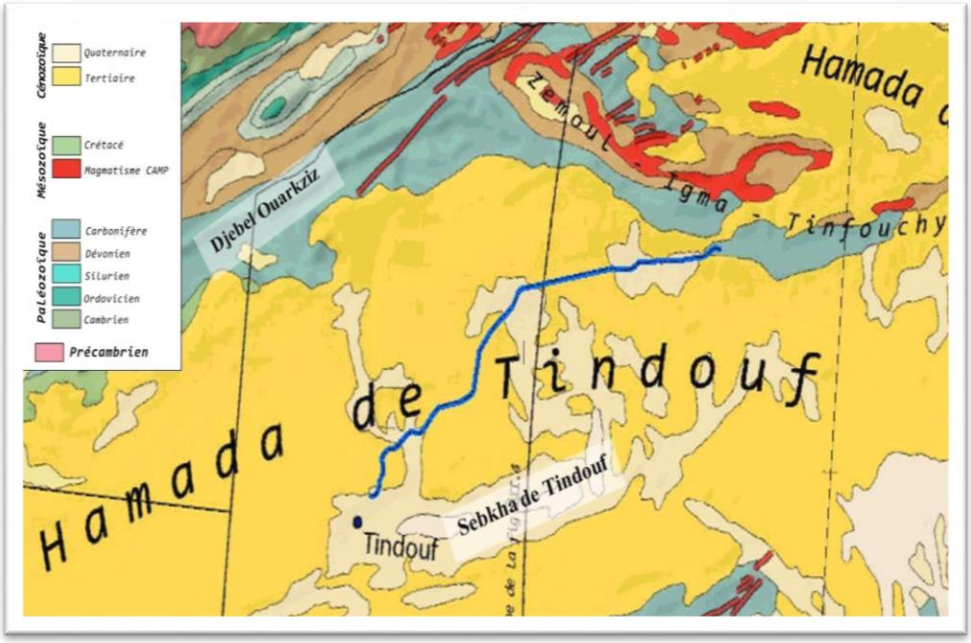


Figure VI-2 : Formes géomorphologiques rencontrées dans la zone traversée par le tracé du projet Béchar – Tindouf entre le PK 640+000 au PK 830+000.[4]

VI.2.3 Aperçu géologique général :

Le bassin de Tindouf, situé à l'extrême ouest de la plate-forme saharienne, constitue une vaste dépression orientée Est-Ouest, couvrant plus de 130 000 km². Il est délimité :

- À l'est et au nord-est par les monts de l'Ougarta et l'ensellement de Krettamia Bou Bernous,
- À l'ouest par les frontières avec le Maroc et la République Arabe Sahraouie Démocratique (RASD),
- Au nord par l'Anti-Atlas marocain,
- Et au sud par le massif des Reguibat.

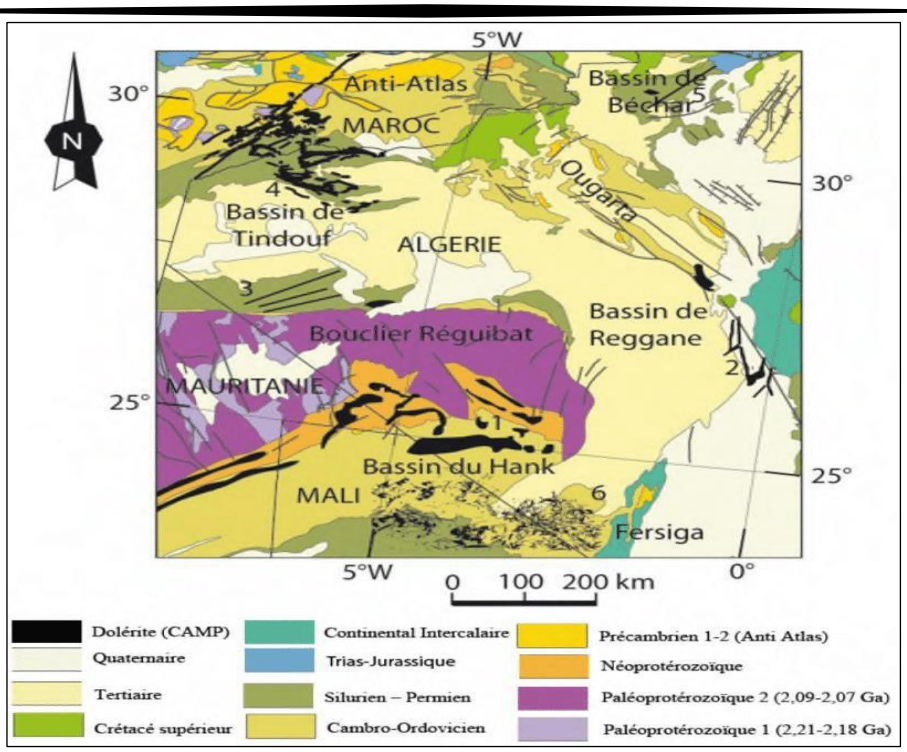


Figure VI-3 : Cadre géologique général de la zone du projet Béchar – Tindouf entre le PK 640+000 au PK 830+000[4].

VI.2.4 Aperçu géologique local :

La zone traversée par le tracé ferroviaire Béchar – Tindouf, entre le PK 795+700 et le PK 821+700, appartient principalement au bassin de Tindouf. Situé à l'extrême sud-ouest de l'Algérie, dans la partie occidentale du Sahara algérien, ce bassin forme une vaste dépression orientée Est-Ouest. Il s'étend sur quatre pays : l'Algérie (où se trouve la majeure partie), le Maroc, le Sahara occidental et la Mauritanie.

Il est délimité au nord par l'Anti-Atlas marocain, au sud par le socle des Reguibat, à l'est par la chaîne de l'Ougarta et à l'ouest par les monts d'Es-Semara. De type péricratonique et dissymétrique, le bassin présente un flanc sud stable, rattaché au craton ouest-africain, et un flanc nord plus structuré. Les affleurements y sont majoritairement paléozoïques, reposant en discordance sur le socle précambrien au sud, tandis que le centre du bassin est recouvert de formations tertiaires caractéristiques des hamadas.

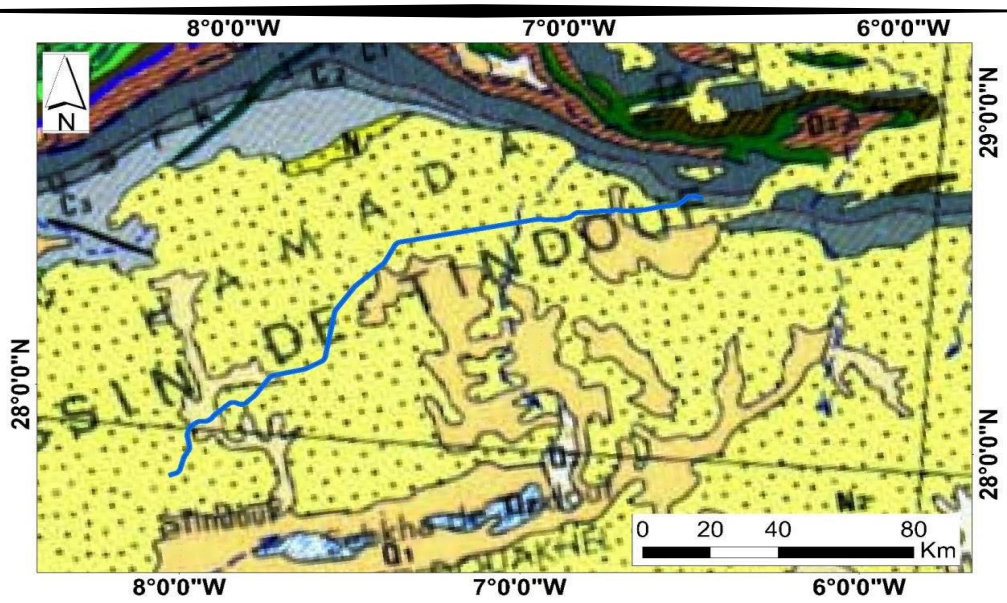


Figure VI-4 : Cadre local du projet Béchar – Tindouf entre le PK 640+000 au PK 830+000[4].

VI.3 ÉTUDE GÉOTECHNIQUE :

L'étude géotechnique consiste à analyser la nature et la composition du sous-sol d'un terrain en déterminant ses caractéristiques physiques et mécaniques. Ces informations sont nécessaires pour évaluer le comportement du sol face aux charges exercées par les ouvrages à construire.

Dans un projet ferroviaire, la connaissance détaillée des terrains traversés est indispensable. Elle permet d'identifier les contraintes géotechniques éventuelles, d'adapter les choix techniques et de garantir la stabilité et la durabilité de l'infrastructure. Les investigations géotechniques représentent ainsi une étape essentielle dans la planification et la conception du tracé.

VI.3.1 Programme d'investigation géotechnique :

Le programme d'investigation géotechnique est élaboré à partir des données et observations recueillies lors de la phase de reconnaissance initiale. Cette première étape permet d'obtenir une évaluation préliminaire des conditions géotechniques du site, en identifiant les zones potentiellement problématiques ainsi que celles nécessitant des investigations complémentaires.

À partir des résultats de cette reconnaissance, le programme d'investigation est structuré de manière à définir les méthodes d'exploration les plus adaptées, les emplacements précis des forages, les types d'essais en laboratoire à réaliser, ainsi que les analyses géotechniques requises.

VI.3.1.1 Reconnaissance de surface :

Les résultats obtenus, ont été synthétisés et présentés dans le présent rapport. Elles ont permis de déterminer :

- La nature et les propriétés des sols en place, accompagnées de la classification des matériaux rencontrés ;
- Les données nécessaires au dimensionnement de la structure de la plateforme ferroviaire.

Dans ce contexte, un programme de reconnaissance géotechnique a été proposé le long du tracé projeté du tronçon compris entre le PK 795+000 et le PK 821+000, sur la base d'une analyse détaillée du plan de tracé et du profil en long.

VI.3.1.2 Plate-forme :

❖ **Section déblai :**

Tableau VI-1 : programme géotechnique des sections en déblai

PK début	PK fin	Hauteur max (m)	Essai géotechnique		
			Essai in situ	Prof (m)	Essai au laboratoire
PK 804+825	PK 805+325	20	-Des sondages pressiomètriques -Des sondages carottés avec installation piézomètre -Essais pénétration standard -Pénétromètre dynamique.	Jusqu'à refus	- Essais d'identification physique (G, γ, W, Ip.). - CBR - Essais de la résistance à la compression simple.
			Puit de reconnaissance	3.00-4.00m	

❖ **Section remblai :**

Tableau VI-2 : programme géotechnique des sections en remblai

PK début	PK fin	Hauteur max (m)	Essai géotechnique		
			Essai in situ	Prof (m)	Essai au laboratoire
PK 805+325	PK 821+00	15.2	-Des sondages pressiomètriques -Des sondages carottés avec installation piézomètre -Essais pénétration standard	Jusqu'à refus	-Essais d'identification physique (G, γ, W, Ip.). -Essai cisaillement rectiligne. -Essai Œdométrique -VBS
			Puit de reconnaissance	2.00-3.00m	

❖ **Lot ouvrage d'art :**

Tableau VI-3 : programme géotechnique pour les ouvrages d'art

Ouvrage	Localisation	Essai géotechnique		
		Essais in situ	Prof (m)	Essais au laboratoire
Passage inferieur (Rétablissement Routier)	PK 807+624	-Des sondages pressiomètriques -Des sondages carottés avec installation piézomètre -Essais pénétration standard	15 m	-Essais d'identification physique (G, γ, W, Ip.). -Essai Œdométrique Essai chimique (VBS).
		Puit de reconnaissance	2.00-3.00m	
Ouvrage d'art (Viaduc)	Du PK 814+008 au PK 814+223	-Des sondages pressiomètriques -Des sondages carottés avec installation piézomètre -Essais pénétration standard	15 m	-Essais d'identification physique (G, γ, W, Ip.). -Essai cisaillement rectiligne. -Essai Œdométrique -Essai chimique (VBS).
Ouvrage d'art (Viaduc)	Du PK 816+573 au PK 817+052	-Des sondages pressiomètriques -Des sondages carottés avec installation piézomètre -Essais pénétration standard	15 m	-Essais d'identification physique (G, γ, W, Ip.). -Essai Œdométrique -Essai chimique (VBS).

VI.3.2 Essai in situ :

• **Sondages carottés :** Réalisés jusqu'à une profondeur de 10 à 15 mètres, équipés de piézomètres et complétés par des essais SPT (Standard Pénétration Test).

• **Essais de pénétration dynamique** : Effectués jusqu'à atteindre le refus du sol.

• **Puits de reconnaissance** : Excavés mécaniquement jusqu'à une profondeur de 4 mètres pour une observation directe des sols en place.

VI.3.3 Analyse et interprétation des résultats de la campagne géotechnique :

VI.3.3.1 Lecture piézométrique :

Afin de déterminer le niveau de la nappe phréatique, des tubes piézométriques ont été installés au niveau des sondages suivants : **F78-LM/TB**, **F79-LM/TB**, **F80-LM/TB, F81-LM/TB**.

Ces installations permettent de mesurer la profondeur de la nappe à différents points du site.

Tableau VI-4 : résultats de la lecture piézométrique[4]

Niveau de l'eau / niveau du terrain naturel actuel (m)							
Date	**F78-LM/TB**	**Date**	**F79-LM/TB**	**Date**	**F80-LM/TB**	**Date**	**F81-LM/TB**
20/05/2023	6.4	13/07/2023	3.35	6/07/2023	4.1	21/05/2023	6.66
21/05/2023	8.5	14/07/2023	5.6	7/07/2023	6.25	22/05/2023	8.2
22/05/2023	10	15/07/2023	6.2	8/07/2023	7.75	23/05/2023	9.5

- **Interprétation des résultats :**

L'analyse des sondages piézométriques montre que la nappe phréatique se situe entre 3,35 m et 10 m de profondeur, indiquant une stabilité adéquate sans risque immédiat pour les constructions.

VI.3.3.2 Essai pénétromètre Dynamique (PDL) :

Cet essai de type B consiste à enfoncer un train de tiges muni d'une pointe conique dans le sol, par battage continu. Le nombre de coups nécessaires pour enfoncer la pointe de 20 cm est enregistré, ce qui permet d'estimer la compacité et la portance du sol ainsi que les frottements le long des tiges.

Tableau VI-5 : résultats d'essai PDL[4]

N° sondage pénétrométrique	PK	Résultats
PDL-405-LM/TB	795+ 500	Refus à 0.6m
PDL-406-LM/TB	797+ 000	Refus à 0.6m
PDL-407-LM/TB	798+ 500	Refus à 0.6m
PDL-408-LM/TB	800+000	Refus à 0.4m
PDL-409-LM/TB	801+ 500	Refus à 1.2m
PDL-410-LM/TB	803+ 000	Refus à 1m
PDL-411-LM/TB	804+ 500	Refus à 1.6m
PDL-412-LM/TB	806+ 000	Refus à 1.2m
PDL-413-LM/TB	807+ 500	Refus à 0.6m
PDL-414-LM/TB	809+ 000	Refus à 1.4m
PDL-415-LM/TB	810+ 500	Refus à 1.2m
PDL-416-LM/TB	812+ 000	Refus à 0.6m

PDL-417-LM/TB	813+ 500	Refus à 0.6m
PDL-418-LM/TB	815+ 000	Refus à 0.6m
PDL-419-LM/TB	816+ 500	Refus à 0.8m
PDL-420-LM/TB	818+ 000	Refus à 1.2m
PDL-421-LM/TB	819+ 500	Refus à 0.6m
PDL-422-LM/TB	821+ 000	Refus à 1m

- **Interprétation des résultats :**

Les résultats des essais PDL confirment ces observations, en révélant des résistances à la pénétration très élevées, témoignant d'une excellente portance du sous-sol. Des refus ont d'ailleurs été enregistrés à des profondeurs comprises entre 0,60 m et 1,60 m, donc **le sol est compact**.

VI.3.3.3 Essais de SPT « Standard Pénétration Test » :

L'essai SPT permet de mesurer la résistance du sol à la pénétration en comptant le nombre de coups nécessaires pour enfoncer un carottier de 30 cm dans le sol.
Dans cette étude, **quatre essais SPT** ont été réalisés dans une **formation argileuse** identifiée par sondage carotté, afin d'évaluer ses caractéristiques mécaniques en profondeur.

Tableau VI-6 : résultats d'essai SPT[4]

N° forage	Profondeur (m)	N_1	N_2	N_3	N_{spt}
F 78-LM/TB	**3.00-3.45**	50	Refus	Refus	**Refus**
	6.00-6.45	Refus	Refus	Refus	**Refus**
	9.00-9.45	Refus	Refus	Refus	**Refus**
F 79-LM/TB	**3.00-3.45**	21	23	33	**56**
	6.00-6.45	Refus	Refus	Refus	**Refus**
	9.00-9.45	Refus	Refus	Refus	**Refus**
F 80-LM/TB	**9.00-9.45**	Refus	Refus	Refus	**Refus**
	3.00-3.45	Refus	Refus	Refus	**Refus**
	6.00-6.45	Refus	Refus	Refus	**Refus**
F 81-LM/TB	**3.00-3.45**	30	45	50	**95**
	6.00-6.45	Refus	Refus	Refus	**Refus**
	9.00-9.45	Refus	Refus	Refus	**Refus**

➢ **Interprétation des résultats :**

Les données du tableau indiquent que la plupart des essais SPT donnent un "Refus", ce qui signifie que **le sol est résistant** et difficile à pénétrer.

VI.3.4 Essais laboratoire :

1. Essais d'identification et de classification physique :

- ✓ Teneur en eau naturelle (Wn %)
- ✓ Densité sèche (γd en t/m³)
- ✓ Analyse granulométrique – *(Norme NF P 94-056)*
- ✓ Limites d'Atterberg (liquide, plastique, limite de retrait) – *(Normes NF P 94-050, NF P 94-051, NF P 94-053)*

2. Essais mécaniques :

- ✓ Essai Proctor Modifié *(NF P 94-093)* :
  Permet de déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale des matériaux compactés.
- ✓ Essai de poinçonnement – CBR immédiat *(NF P 94-078)* :
  Sert à évaluer la portance des sols utilisés en remblai ou en couche de forme.

3. Essais chimiques :

- ✓ Essai au bleu de méthylène (VBS) *(NF EN 933-9)* :
  Permet de déterminer la teneur en éléments fins argileux dans les matériaux.

VI.3.4.1 Résultats des essais obtenus en laboratoire :

VI.3.4.1.1 Sondage carotté :

Tableau VI-7 : résultats des essais physiques de sondage carotté

N° forages	Profondeur(m)	Densité (t/m3)	Limites d'Atterberg			Granulo	RCS	Classification	
		γ_d(t/m3)	W_l	Wp	Ip	<80 µm	MPa	UIC	GTR
F-78-LMTB	4.00–5.00	1.82	41.40	20.10	21.30	20.13	20.8	-	B6
F-79-LMTB	4.00–5.00	/	/	/	/	/	/	/	/
F-80-LMTB	4.00–5.00	/	/	/	/	/	/	/	/
F-81-LMTB	4.00–5.00	1.86	34.8	20.8	14	12	21.5	-	B6

- **Interprétation des résultats :**

D'après les résultats des essais de laboratoire, on peut conclure ce qui suit :

- ✓ La densité sèche varie entre **1,80 t/m³ et 1,82 t/m³**, ce qui dénote un **sol dense**.
- ✓ La granulométrie **inférieure à 80 µm est ≤ 35 %**, ce qui indique un **sol sableux à graveleux avec présence de fines**.
- ✓ L'indice de plasticité (**IP > 12 %**) traduit un **sol argileux moyennement plastique**.
- ✓ La résistance à la compression simple (**RCS entre 20 MPa et 60 MPa**) correspond à

VI.3.4.1.1 Puits de reconnaisses :

Tableau VI-8 : résultats des essais physiques des puits de reconnaissance

Puits	Unité géo	Granulométrie	Limites d'Atterberg (%)			Proctor		CBR	VBS	Classification	
		<80 µm	W_l	Wp	Ip	γ_d (t/m3)	Wopm %			UIC	GTR
PU-408-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	15	22,00	12,00	10,00	2.18	11.90	34.60	0.36	QS2	B5
PU-409-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	19	19,00	10,00	9,00	2.11	11.30	40.10	0.96	QS2	B5
PU-410-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	14	20,00	10,00	10,00	2.19	12.50	21.20	0.33	QS2	B5
PU-411-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	12	17,00	8,00	9,00	2.21	11.10	35.70	0.30	QS2	B5
PU-412-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	19	17,00	10,00	7,00	2.25	9.50	44.60	0.40	QS2	B5
PU-413-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	15	39,00	26,30	12,70	1.92	8.00	33.00	0.57	QS2	B5
PU-414-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	19	34,80	21,80	13,00	1.95	12.00	47.00	0.42	QS2	B5
PU-415-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	14	36,40	18,50	17,90	1.94	8.00	41.00	0.51	QS2	B5
PU-416-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	16	36,40	21,70	14,70	1.95	12.00	47.00	0.35	QS2	B5
PU-417-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	12	51,60	33,50	18,10	1.86	12.00	17.00	0.72	QS2	B5
PU-418-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	18	/	/	/	1.88	14.00	77.00	/	QS2	B5
PU-419-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	12	26,40	15,60	10,80	2.03	11.00	63.00	0.32	QS2	B5
PU-420-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	19	/	/	/	2.14	8.00	69.00	0.18	QS2	B5
PU-421-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	14	37,40	19,90	17,50	1.84	12.00	33.00	0.63	QS2	B5
PU-422-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	20	/	/	/	2.06	8.00	79.00	0.20	QS2	B5
PU-423-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	12	/	/	/	2.08	11.00	50.00	0.20	QS2	B5
PU-424-LM/TB	Unité 1 : calcaire Unité 2 : sable	12	/	/	/	2.10	12.00	66.00	0.30	QS2	B5
PU-425-LM/TB	Unité 1 : calcaire /sable	16	31,50	22,50	9,00	2.02	9.00	40.00	0.33	QS2	B5

➢ **Interprétation des résultats :**

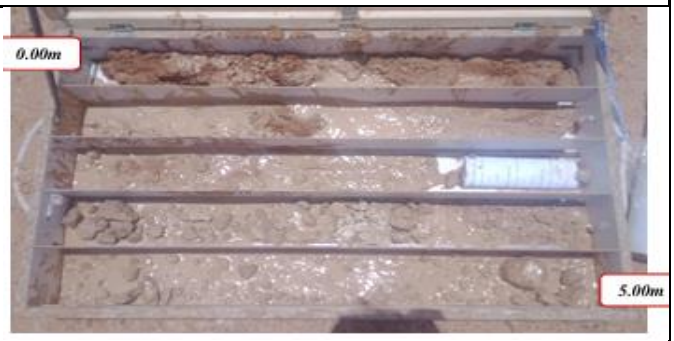
- ✓ La granulométrie démontre un sol grenu et fine.
- ✓ Les valeurs de l'indice de plasticité (IP) varient entre **7,00 % et 18,00 %** ; elles indiquent un **sol argileux à plasticité faible à moyenne**, présentant une **bonne cohésion** et **une sensibilité modérée à l'eau**.
- ✓ Les **densités sèches** varient entre **1,84 t/m³ et 2,25 t/m³**, ce qui indique que le **sol est relativement dense et cohérent**, et présente une **bonne capacité de portance**.
- ✓ Les **teneurs en eau optimales** varient entre **8 % et 14 %**, ce qui signifie que le **sol est dur** et offre une **bonne stabilité**.
- ✓ Les résultats de l'indice de portance CBR immédiat varient entre 17 et 79 ce qui indique **une portance variant de bonne à très bonne.**
- ✓ Les valeurs du VBS varient entre **0,30 et 0,96**, ce qui indique une **faible teneur en argiles actives**, assurant une **bonne perméabilité** et une **stabilité mécanique** satisfaisantes.

❖ D'après la classification GTR, le sol est identifié en catégorie **B5 : sables et graviers très silteu**

VI.3.5 La lithologie de terrain :

Tableau VI-9 la lithologie de terrain[4]

Sondage	Profondeur (m)	Description de sol	Photo de sondage
F 78-LM/TB	0m –5m	Alternance de calcaire et sable rougeâtre	
	6m – 10m	Calcaire altéré blanchâtre	

F 79-LM/TB	**0m –5m**	**Sable rougeâtre à graves et cailloux de calcaire**	
	5m – 10m	**Calcaire, altéré, récupéré en morceau, blanchâtre**	
F 80-LM/TB	**0m –5m**	**Calcaire, altéré, récupéré en morceau, blanchâtre**	
	5m – 10m	**Calcaire, altéré, récupéré en morceau, blanchâtre**	
F 81-LM/TB	**0m –5m**	**Sable rougeâtre**	

	5m – 10m	**Sable calcareuse compacte**	

➢ **Interprétation des résultats :**

Les données des sondages carottés ont mis en évidence deux ensembles lithologiques distincts. Le socle profond (5–10 m) est formé d'un calcaire altéré, récupéré en blocs blanchâtres, parfois compact et induré. Il est surmonté, entre 0 m et 5 m, d'une couche de sable rougeâtre à graveleux, où alternent horizons sableux fins et lentilles calcaires plus grossières.

VI.3.6 Matériaux de déblai :

Les essais en laboratoire ont révélé deux types de sol :

- **Sol semi rocheux jusqu'à 1,5 m de profondeur** : excavation réalisée par pelle mécanique ou niveleuse.
- **Sol rocheux au-delà de 1,5 m** : excavation nécessitant l'usage d'explosifs et/ou de brise-roche.

VI.3.7 Matériaux de remblais :

Les gites d'emprunt pour la réalisation des remblais sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI-10 : Les gites d'emprunt

Localisation		**Essais In Situ**		**Nature du Sol**	**Classe UIC**	**Utilisation**
Type	**A proximité en parallèle**	**Essai In Situ**	**Prof. (m)**			
Gite 42	PK 800+ 000	PU38	4.0	Grès calcaire	QS2	-Sous ballast -Couche de forme -Couche de fondation -Matériau en zone inondable -Couche supérieur du remblai
Gite 43	PK 810+ 000	PU38	4.0	Grès calcaire	QS2	-Sous ballast -Couche de forme -Couche de fondation -Matériau en zone inondable -Couche supérieur du remblai

VI.4 Zone d'inondable :

- **La purge:** La purge est une méthode géotechnique employée pour renforcer la stabilité d'un remblai ferroviaire, en remplaçant le sol en place par un matériau drainant. L'épaisseur minimale de cette couche est généralement de 0,5 mètre, sauf en cas d'affleurement rocheux.
- **Géotextile protecteur contre les inondations:** Le géotextile est un matériau non tissé utilisé pour filtrer l'eau tout en retenant les particules fines du sol. Placé autour du noyau central en zone inondable, il limite les infiltrations et protège le sol contre l'érosion.
- **Matériaux zone inondable:** Le tableau présenté dans (Annexe-E-) définit les caractéristiques des matériaux selon la norme

VI.5 CONCLUSION :

L'étude réalisée sur la section du tracé entre le PK 795+000 et le PK 7821+000 révèle que le terrain est meuble jusqu'à 1,5 mètre de profondeur, puis devient semi-rocheux à rocheux en profondeur. La nature superficielle du sol est principalement sableuse avec des caractéristiques favorables, classée QS2 selon l'UIC (Annexe-C-), tandis que la roche en profondeur est classée R2 selon la norme NF P11-300.

Ces conditions géotechniques sont globalement satisfaisantes pour la réalisation des travaux prévus, à condition d'adopter les techniques d'excavation et de remblai adaptées à la stratigraphie rencontrée.

DIMENSIONEMENT DE LA COUCHE D'ASSISE

VII. CHAPITRE VII : DIMENSIONELENT DE LA COUCHE D'ASSISE

VII.1 INTORDUCTION:

La conception d'une plateforme ferroviaire requiert une analyse rigoureuse des caractéristiques du sol, des charges d'exploitation et des matériaux disponibles. Conformément à la norme UIC 719R, le dimensionnement des différentes couches ballast, sous-ballast, couche de fondation et couche de forme vise à assurer la stabilité et la durabilité sécurité de l'infrastructure ferroviaire. Ce chapitre présente la méthodologie adoptée pour déterminer les épaisseurs optimales de chaque couche, en tenant compte des spécificités du projet.

VII.2 STRECTURE COUCHE D'ASSISE:

VII.2.1 Couche ballast:

Le ballast est constitué de pierres concassées très dures, issues du concassage des roches massives. La granulométrie doit être comprise entre 31,5 mm et 50 mm pour former une masse compacte mais perméable.

L'épaisseur standard de la couche de ballast sous les traverses est de 30 cm à l'aplomb du rail en pleine voie. Cette épaisseur correspond à environ 2 000 tonnes de ballast par kilomètre de voie garantissant une assise stable et durable pour les traverses et les rails **[9]**.

Le ballast doit présenter des caractéristiques mécaniques élevées pour résister aux contraintes du trafic ferroviaire:

- Il doit être conforme à la norme EN 53-695.
- Une résistance à l'usure déterminée par l'essai Micro-Deval (MDA ≤ 10,5)
- Une résistance à la fragmentation par chocs selon l'essai Los Angeles (LA ≤ 25).
- La valeur combinée (LA + 2×MDA) doit être ≤ à 37.

❖ **Rôle de ballast:**

- Transmettre les charges et répartit les efforts engendrés par le passage des trains vers la plateforme, évitant les déformations par tassement.
- Assurer la stabilité des traverses et la résistance aux déformations longitudinales
- Grâce à sa granulométrie spécifique, le ballast permet le drainage efficace des eaux de pluie.
- Le ballast agit comme un amortisseur, absorbant les vibrations générées par le passage des trains, ce qui protège les composants de la voie et améliore le confort des passagers.
- En agissant comme une barrière isolante, le ballast protège le sol contre le gel, préservant ainsi l'intégrité de la plateforme ferroviaire.

VII.2.2 Sous couche:

Dans le domaine ferroviaire, la sous-couche est une couche intermédiaire située sous la plateforme inclinée de manière transversale de 3 à 5 %, peut être constituée d'une seule couche, ou d'un ensemble de couches comprenant :

- La sous couche de ballast est nécessaire dans toutes les structures de voie ferrée.
- Une couche de fondation selon les besoins géotechniques.
- Une couche anti-contaminant (en sable ou en géotextile) et une couche drainante pour facilite l'évacuation des eaux (dans les zone inondable).

❖ **Rôle de sous couche :**

- Assure une bonne répartition des charges transmises par les trains
- Réduit les vibrations générées par le passage des trains, contribuant au confort des usagers
- Protège la plateforme contre l'érosion, notamment celle causée par Le poinçonnement du ballast et l'action des eaux de surface.

VII.2.3 La couche sous ballast :

La couche de sous-ballast est placé entre le ballast et la couche de fondation pour assurer une transition mécanique efficace et permettre une meilleure répartition des contraintes vers les couches inférieures. Généralement réalisée à l'aide d'une grave propre bien calibrée, de type 0/31,5 mm, contenant au moins 30 % de matériaux concassés. Ces matériaux proviennent souvent de carrières ouvertes et doivent répondre à des critères de qualité stricts :

- Valeur de propreté (VBg) **≤ 1**
- Coefficient de forme (A) **≤ 25 %**
- Résistance à l'usure (LA + MDE) **≤ 40**

VII.2.4 La plateforme:

La plateforme ferroviaire constitue la partie supérieure de la structure sur laquelle repose la sous-couche de la voie. Elle assure la transmission des efforts mécaniques induits par la circulation des trains. Selon le type de terrassement :

- En remblai, la plateforme est constituée de terres rapportées.
- En déblai, elle repose directement sur le sol en place.

Le sol de la plateforme doit répondre à plusieurs exigences :

- Répartir les charges de manière homogène.
- Protéger la structure contre les infiltrations et remontées de fines
- Permettre un bon drainage des eaux de pluie et des eaux souterraines.
- Atténuer les vibrations engendrées par le passage des trains.

Couche de forme:

La couche de forme est une couche intermédiaire située entre la PST et la couche d'assise du ballast. Elle permet d'homogénéiser les caractéristiques du sol support, d'améliorer la portance et de répartir les charges du aux trafic ferroviaire et elle sert de fondation mécanique pour le sous-ballast et le ballast à venir. Réalisée en matériaux granulaires soigneusement choisis et compactés.

La couche de forme n'est pas nécessaire dans une structure de voie ferrée. Sa mise en œuvre dépend de la classe de portance de la plateforme.

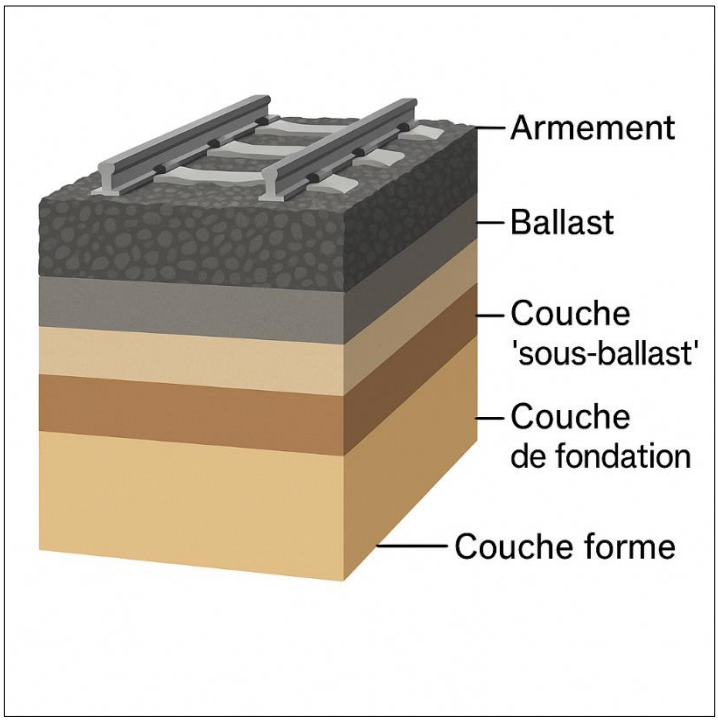


Figure VII-1 les couches d'infrastructure ferroviaire

VII.3 Dimensionnement des couches d'assise:

Le dimensionnement de la couche d'assise et de l'épaisseur de la couche de forme a été effectué en suivant les indications de la fiche UIC 719R.

VII.3.1 Classe de portance de la plateforme :

La classe de portance d'une plateforme ferroviaire est un paramètre essentiel dans la conception et le dimensionnement des infrastructures ferroviaires. Elle détermine la capacité du sol support et des couches supérieures à résister aux charges induites par le trafic ferroviaire.

L'étude géotechnique du projet Béchar – Gara Djebilet indique que la majorité des sols rencontrés sont de classe QS2. Conformément aux recommandations de l'UIC 719R, il est préconisé d'utiliser une couche de forme en matériaux QS3 pour atteindre une plateforme de classe P3. Donc une couche de forme de 0.35m est nécessaire.

Tableau VII-1 la classe de portance de la plateforme (Fiche UIC 719R)[1]

Qualité du sol support	Classe de la plateforme	Couche de forme	
		Qualité	Epaisseur 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	--

VII.3.2 Calcule de l'épaisseur de la couche d'assise :

L'épaisseur de la couche d'assise se calcule selon la formule:

$$\mathbf{e = E + a + b + c + d + f + g}$$

Où:

− E = classe de la plateforme P1, P2, P3
− a = classe de la voie (groupe de 1 à 6 voir UIC 714).
− b = type et longueur de la traverse
− c =type de dimensionnement
− d =la charge maximale à l'axe
− g = Géotextile.

Le tableau détaillé, conforme à la norme UIC 719R, est présenté dans l'Annexe D

- **Pour notre projet :**

Tableau VII-2: Tableau des coefficients pour notre projet

Coefficient	Valeur retenue	Justification / Condition
E	0,45 m	Portance de sol classe P3
a	0 m	Groupe de trafic UIC 1
b	0,05 m	Traverses béton L=2,415 m → (2,50−2,415)/2 ≃ 0,0425 → arrondi 0,05 m
c	0 m	Dimensionnement normal (nouvelle ligne)
d	+0,15 m	Charge d'essieu = 32,5 t ≃ 318 kN → facteur d = +0,15 m
f	0.05 m	ligne à grande vitesse
g	0 m	Sol support de qualité QS3

L'épaisseur de couche d'assise est **0.70m.**

Tableau VII-3: épaisseurs et matériaux de couche d'assise

Couches	Catégorie	Épaisseur (cm)	Matériaux
Ballast	Couche principale	30	Granit ou basalte
Sous-ballast	Sous-couche	20	Grave propre entièrement concassée (0/31,5 mm)
Couche de fondation	Sous-couche	20	Grave sableuse entièrement concassée
Couche de forme de type QS3	Couche de forme	35	Grave 0/D

❖ **Pour le remblai:**

- **Partie supérieur du corps de remblai** : **1m en QS3**

→ Pour la diffusion des charges lourdes (32.5tonne.)

- **Partie inférieur du corps de remblai : QS2**

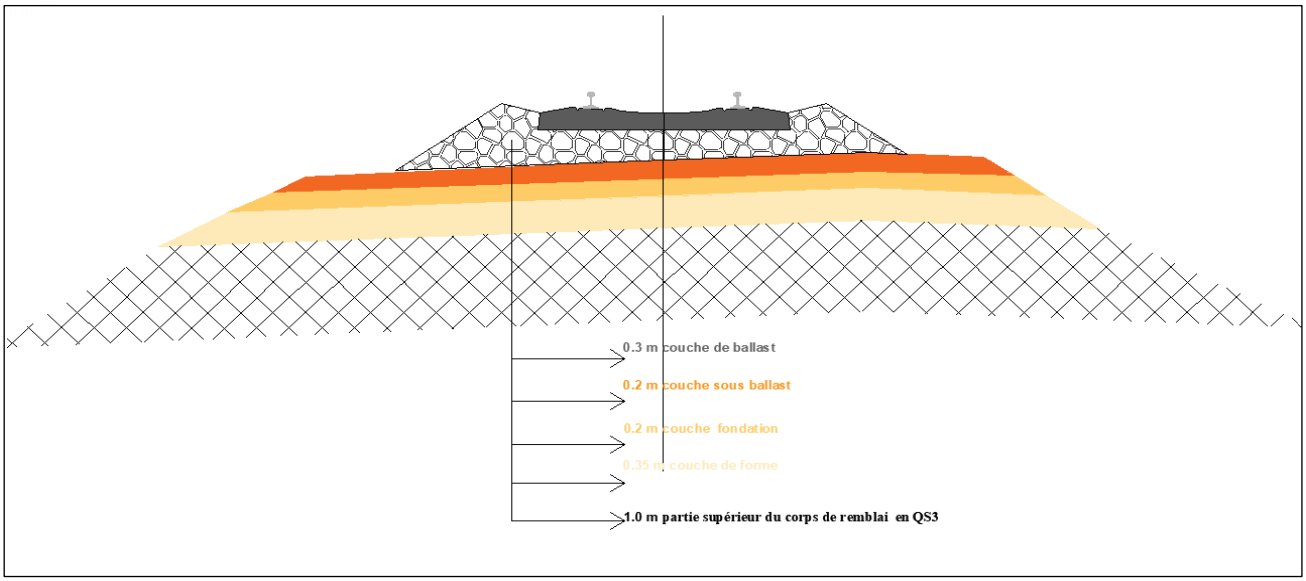


Figure VII-2 : Profil en coupe des couches d'assise avec épaisseurs

VII.4 Conclusion :

L'application des principes de dimensionnement selon la norme UIC 719R a permis de définir une structure de plateforme adaptée aux contraintes du projet. Les épaisseurs déterminées pour chaque couche garantissent une répartition efficace des charges et une performance optimale de la voie ferrée. Cette approche assure la pérennité de l'infrastructure tout en répondant aux exigences techniques et réglementaires.

PROFIL EN TRAVERS

VIII. CHAPITRE VIII : PROFIL EN TRAVERS

VIII.1 Introduction:

Ce chapitre présente les profils en travers adoptés dans le cadre du projet de la ligne ferroviaire Tindouf – Gara Djebilet. On distingue plusieurs profils type selon les conditions du terrain et les zones traversées :

- Le profil type en remblai, en déblai et au niveau des gares, plus large, intégrant des aménagements spécifiques pour les voies de service.
- Le profil courant représente, quant à lui, les sections répétitives le long du tracé en dehors des zones particulières.

L'ensemble de ces profils permet de définir la structure transversale complète de la voie ferrée (superstructure, infrastructure, talus, fossés, etc.) et constitue une base essentielle pour le calcul des cubatures et l'ajustement du projet au terrain naturel.

VIII.2 Les éléments constitutifs du profil en travers:

Tableau VIII-1 Les éléments du profil en travers

Catégorie	Éléments
Éléments de superstructure	• Le type de rail utilisé et la valeur de l'écartement de chaque voie. • Le type des traverses utilisées. • La valeur du dévers maximale en courbe.
Éléments d'infrastructure	• Les épaisseurs, la nomination et les pentes de chaque couche. • La pente latérale de la plate-forme.
Éléments du talus	• La pente de chaque talus. • Les ouvrages de consolidation.
Éléments d'assainissement	• Le type et la dimension du fossé, des drains ou des ouvrages d'assainissement.

VIII.3 Le profil en travers du projet d'étude:

Le profil en travers de référence utilisé dans ce projet correspond à une voie unique, avec un écartement de 1435 mm, conforme aux standards internationaux. Ce profil est applicable en remblai qu'en déblai, avec une largeur de plateforme uniforme de 8,0 m.

La superstructure de la voie est composée de rails de type UIC-60 E1, posés sur des traverses monoblocs en béton précontrainte, disposées sous la file de rail en position abaissée. La plateforme ferroviaire est constituée des couches suivantes :

- **Une couche de forme** : épaisseur de 0,35 m.
- **Un sous-ballast** : épaisseur de 0,30 m, mis en œuvre sous forme 0,30 m de, avec une pente transversale de 4 % de chaque côté pour faciliter le drainage.

Concernant les talus:

- **En remblai**: l'inclinaison des talus est de 1V/2H.
- **En déblai**: l'inclinaison est de 3V/1H.

Des fossés longitudinaux sont prévus en pied de talus pour assurer un assainissement efficace du tracé.

- **Pour la zone inondable** : l'ajout du des enrochements latéraux, avec géotextile anti-contaminant au tour du noyau de remblai (Annexe -D-)

VIII.4 Calcul des cubatures:

Les travaux de terrassement, appelés aussi mouvements des terres, ont pour objectif de modifier le relief naturel du terrain afin de le rendre apte à accueillir des ouvrages. Ils consistent principalement en deux opérations : le déblai (retrait de terre) et le remblai (ajout de terre). Ces opérations sont étudiées à partir des profils en long et en travers, permettant d'estimer avec précision les cubatures nécessaires pour obtenir une plateforme uniforme et adaptée au projet.

Pour notre projet, nous avons utilisé le logiciel Covadis pour effectuer le calcul automatique des cubatures de terrassement:

Tableau VIII-2 Les cubatures des couches d'assise.

Couche	Ballast	Sous ballast	Couche de fondation	Couche de forme
Volume (m^3)	66336.9	35996.9	39317.6	76796.3

Tableau VIII-3 Les cubatures des terrassements.

Volume de déblai (m^3)	**Volume de remblai (m^3)**
688394.5	2092577.2

VIII.5 Conclusion:

Le profil en travers offre une représentation complète de la superstructure, de l'infrastructure, des talus, du système de drainage, ainsi que de l'environnement immédiat. Cette vue d'ensemble facilite la prise de décisions techniques liées à la construction, à la sécurité et à la performance de l'ouvrage. De plus, il intègre des considérations environnementales permettant de limiter l'empreinte écologique du projet.

Remarque :

- Profil en travers type de la voie unique en plein voie/ en courbe/viaduc sont présente dans la planche N°02
- Profil en travers tuype de la voie unique de la zone inondable planche N°03
- Profil en travers type de la voie unique remblai max / déblai max planche N°04
- Profil en travers type de la voie unique de la gare planche N°05

TERRASSEMENT ET OUVRAGE D'ART

IX. CHAPITRE IX : TERRASSEMENT ET OUVRAGE D'ART :

IX.1 LES TERRASSEMENTS :

Les travaux de terrassement visent à modifier la topographie d'un terrain pour créer une plate-forme ferroviaire adaptée. Ils comprennent deux opérations principales :

- **Le déblai :** consiste à retirer des matériaux du sol existant pour abaisser les zones surélevées.
- **Le remblai :** consiste à ajouter des matériaux pour combler les creux et élever le niveau du sol.

Ces travaux peuvent entraîner la formation de talus, c'est-à-dire des pentes latérales qui, sans mesures de stabilisation adéquates, risquent de glisser, surtout lorsque les hauteurs de déblai ou de remblai sont importantes.

Les travaux de terrassement se déroulent en trois étapes :

- Extraction : prélèvement des matériaux nécessaires.
- Transport : acheminement des matériaux vers le site.
- Mise en place : dépôt des matériaux en remblai ou en dépôt.

IX.1.1 CONDITIONS DE RÉALISATION DES REMBLAIS :

Pour garantir la stabilité et la durabilité d'un remblai, il est important de respecter les points suivants :

- Retirer la terre végétale avant tout travail de remblaiement.
- Mettre en œuvre le remblai par couches de 30 cm d'épaisseur maximum.
- Compacter chaque couche avec des engins adaptés (compacteurs).
- Utiliser un matériau de remblai approprié, conforme aux exigences techniques.
- Assurer un drainage efficace avec une pente transversale minimale de 4% pour éviter la stagnation des eaux pluviales.
- Respecter les prescriptions géotechniques et les normes de terrassement en vigueur.

IX.1.2 CONDITIONS DE RÉALISATION DES DÉBLAIS :

Pour assurer la sécurité des travailleurs et limiter les risques environnementaux lors de l'excavation, il est essentiel de :

- Évaluer le site pour détecter les dangers (câbles, canalisations, gaz, drainage, etc.).
- Planifier soigneusement les travaux et surveiller en continu les conditions du terrain.
- Délimiter clairement la zone d'excavation.
- Prévenir les effondrements à l'aide de soutènements appropriés (étais, palplanches, etc.).
- Évacuer les matériaux excavés en toute sécurité avec des engins adaptés.
- Fournir et utiliser les équipements de sécurité nécessaires pour le personnel.

IX.1.3 PENTES ET TALUS :

La pente du talus dépend principalement de trois facteurs :

- Le type de sol : les sols cohérents (argiles, limons) sont plus stables que les sols pulvérulents (sables, graviers).
- La hauteur du remblai ou du déblai.
- Les charges appliquées (circulation, équipements, structures…).

❖ **Cas de notre projet :**

- Talus en remblai : 2H/1V
- Talus en déblai : 1H/3V

IX.1.4 TASSEMENT :

Lors de l'étude des tassements, il est essentiel de vérifier que les déformations prévisibles après la mise en service sont compatibles avec la stabilité de l'ouvrage. En cas de sols sensibles à l'eau, au gel ou dans un contexte hydrologique défavorable, des mesures spécifiques doivent être prises, telles que :

- Protection des remblais avec une couche de sol de meilleure qualité.
- Installation de drains verticaux pour accélérer la consolidation.
- Élimination des sols compressibles du support si leur profondeur est faible.

IX.1.5 LA STABILITÉ :

La stabilité d'un talus désigne sa capacité à résister à un glissement ou à un effondrement. L'analyse de cette stabilité s'applique principalement aux grands ouvrages en remblai ou en déblai, notamment lorsque les hauteurs dépassent 6 mètres pour les déblais et 8 mètres pour les remblais. L'étude de stabilité des talus prend en compte plusieurs facteurs essentiels :

- La cohésion du sol (C).
- L'angle de frottement interne (ϕ').
- Le poids spécifique du sol (γ).
- La pente du terrain.
- La charge appliquée sur le talus.
- Les conditions environnementales (eau, gel, etc.).

Ces paramètres sont intégrés dans des méthodes de calcul spécifiques pour assurer la stabilité des ouvrages.

✓ La vérification consiste à calculer le facteur de sécurité (Fs) global pour différentes positions des cercles de rupture.

Les critères de sécurité sont les suivants :

- **Fs ≥ 1,5** à long terme,
- **Fs ≥ 1,3** à court terme,
- **Fs ≥ 1,0** en situation accidentelle (ex : séisme).

➢ **Cas remblai :**

Hmax	PK	Pente proposé	FS
15.2 m	809+350	2H/1V avec une berme de 2 m	1.59

Tableau IX-1 Les paramètres géotechniques du notre sols cas remblai

Couches	γ [kN/m3]	φ(°)	C(kPa)
Remblai	20	30	5
Sol support	18	26	22

Les Résultats de calcule des stabilités des talus par GEO 5.0 2020 dans les cas de notre projet:

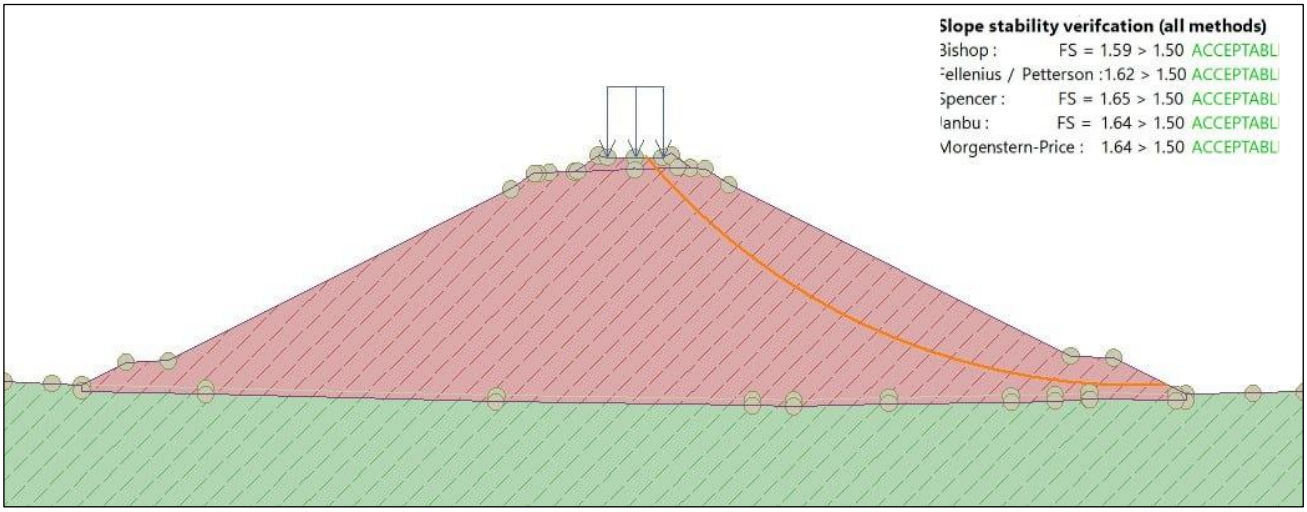


Figure IX-1 Vérification de la stabilité de remblai avec une pente de 2H/1V

Tableau IX-2 les résultats de calcul de stabilité de remblai

Fs	Fs exigé	Fs calculé	Observations
Long terme	**1,5**	**1.59**	**Vérifiée**

➢ **Cas déblai :**

Hmax	PK	Pente proposé	FS
20.0 m	804+825	1H/3V avec une berme de 2 m	1.63

Tableau IX-3 Les paramètres géotechniques du notre sols cas deblai

Couches	γ [kN/m3]	φ(°)	C(kPa)
Rocheux	20	40	55
Semi rocheux	18	12	22

Les Résultats de calcule des stabilités des talus par GEO 5.0 2020 dans les cas de notre projet:

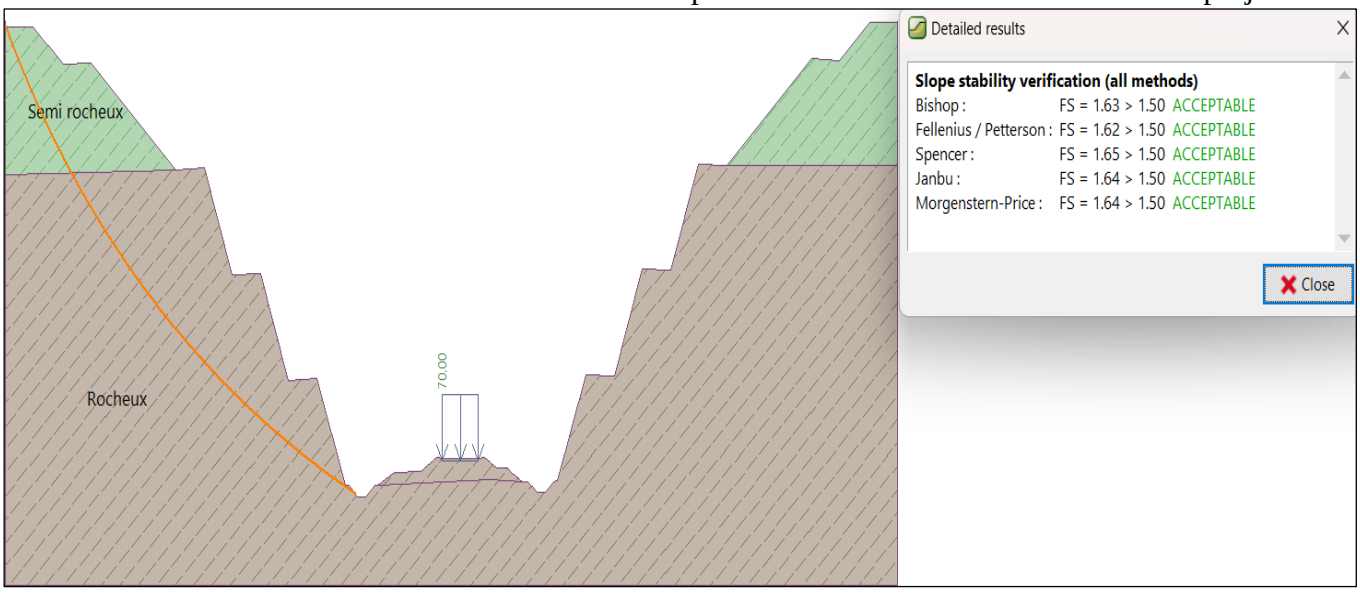


Figure IX-2 Vérification de la stabilité de deblai avec une pente de 1H/3V

Tableau IX-4 les résultats de calcul de stabilité de deblai

Fs	Fs exigé	Fs calculé	Observations
Long terme	**1,5**	**1.63**	**Vérifiée**

IX.2 LES OUVRAGES :

Il existe plusieurs types d'ouvrages, notamment :

- Ponts rail
- Passages supérieurs (ponts routiers)
- Passages inférieurs (ponts cadres)
- Structures de protection
- Ouvrages hydrauliques

Le choix du type d'ouvrage dépend de plusieurs contraintes :

- Topographiques et géomorphologiques : écoulement des eaux, nature du sol, relief.
- Techniques : portée, charges à supporter, gabarit (dimensions).
- Économiques et fonctionnelles : coûts, usages prévus.

IX.2.1 LES OUVRAGES D'ART DU PROJET :

A partir des données et résultat obtenu de l'étude hydrologique et hydraulique deux ouvrage d'art doit projetés au niveau d'oued et oued Sebti el foukani :

Ouvrage	Longueur	Travée	PK début	PK fin
PONT OUED	210	6 de 35m	814+008	814+223
PONT OUED Sebti el Foukani	455	13 de 35m	816+573	817+052

IX.2.2 LES OUVRAGES HYDRAULIQUES:

Selon l'importance de cours d'eau franchie deux types des ouvrages hydrauliques sont envisagé à construit :

- Des buses seront installées pour les cours à petit taille et à faible débit.
- Des dalots seront privilégiés pour les cours d'eau les plus important et à grand débit.

Le détaillé dans l'étude hydraulique (Chapitre étude hydrologique et hydraulique)

→ De plus, dans les deux zones inondables s'étendant du PK 799+150 au PK 799+360 et PK 813+325 au PK 820+325 il est crucial d'installer des buses d'équilibre environ tous les 1 km (plus ou moins) pour mieux gérer les écoulements d'eau pendant les périodes d'inondation.

IX.3 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons montré que les travaux de terrassement réalisés selon les normes garantissent une plateforme stable, et que le bon dimensionnement des ouvrages permet d'assurer la sécurité et la durabilité de l'infrastructure ferroviaire.

CONCEPTION ET AMENAGEMENT DE L A GARE

X. CHAPITRE X : CONCEPTION ET AMÉNAGEMENT DE LA GARE

X.1 Introduction:

Une gare ferroviaire est un point d'arrêt essentiel pour les trains, conçu à la fois pour accueillir les passagers et pour gérer le transport des marchandises. Ces infrastructures varient selon leur taille, leur localisation et leur rôle dans le réseau ferroviaire. Ce chapitre a pour objectif de présenter les principales fonctions d'une gare ferroviaire et d'exposer la conception spécifique des voies de la gare de bifurcation prévue à Tindouf.

X.2 Les type des gares Ferroviaires:

Les gares ferroviaires se classent principalement selon leur fonction en cinq grandes catégories :

- **Gares voyageurs**: équipées de quais, salles d'attente et services pour l'embarquement des passagers
- **Gares marchandises**: dédiées au fret avec voies de chargement/déchargement, entrepôts et grues.
- **Gares mixtes**: combinant installations passagers et fret sur un même site
- **Gares de triage**: Une gare de triage est un ensemble de voies et d'aiguillages disposés en éventail où l'on trie et regroupe les wagons de marchandises pour former des trains selon leurs destinations.
- **Gares de croisement**: points d'élargissement de la voie unique permettant à deux trains de se croiser ou dépasser, souvent réduits à de simples haltes.

X.3 Présentation Générale de la Gare de Bifurcation

X.3.1 Définition et Fonction:

Une gare de bifurcation est une gare où plusieurs lignes de chemin de fer se rejoignent où se séparent. Cela signifie que des trains peuvent venir de différentes directions et changer de ligne pour continuer leur trajet ailleurs. Ce type de gare est très important dans un réseau ferroviaire, car il permet de diriger les trains vers différentes destinations. Elle facilite aussi la gestion du trafic, en permettant par exemple le passage des trains de marchandises vers des zones industrielles ou minières, comme c'est le cas dans notre projet.

X.3.2 Description Générale de la Gare:

La future gare de bifurcation sera implantée entre le point kilométrique PK 806+950 et le PK 809+350. Elle occupe une position stratégique car elle permet la séparation des flux ferroviaires vers plusieurs destinations importantes.

La gare est composée de plusieurs voies, organisées comme suit :

- Deux voies principales.
- Deux voies d'évitement ou de service utilisées pour le stationnement temporaire des trains.
- Deux voies tiroirs pour le stationnement.

Chaque voie principale dessert une direction spécifique :

- La voie principale 01 permet la circulation des trains vers Gara Djebilet
- La voie principale 02 prenne la direction vers de Tindouf

Les voies tiroirs se terminent par des heurtoirs (H1 et H2), qui sont des dispositifs de sécurité installés à l'extrémité des voies pour éviter tout dépassement.

X.4 Aménagements Fonctionnels de la Gare:

X.4.1 Voie de Garage Franc:

Le garage franc détermine la limite de la zone de voie utilisée par les trains en gare afin d'assurer la sécurité des circulations. Il garantit qu'il n'y aura ni collision ni risque de prise en écharpe entre un train dévié sur une voie secondaire (voie de stationnement) et un train circulant sur la voie principale.

La valeur théorique du garage franc est calculée en fonction de la distance entre les axes de la voie directe et de la voie déviée, selon la formule suivante :

$$\mathbf{GF = (3{,}57 \times N) + 1}$$

Où N dépend de l'angle d'ouverture α\alphaα de l'appareil de voie et est donné par :

$$\mathbf{N = (1 / \tan(\alpha))}$$

En raison de sécurité, le garage franc sera installé à 1.0 m de la distance de garage franc théorique.

Ainsi, le garage franc assure une circulation sécurisée dans la gare en délimitant clairement les espaces réservés aux trains circulant sur différentes voies.

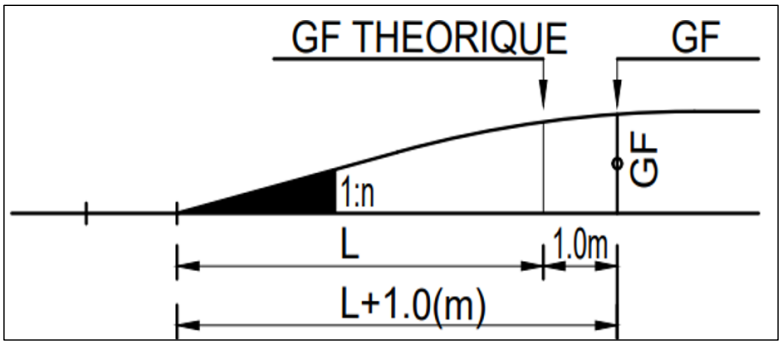


Figure X-1 Garage franc

X.4.2 Heurtoir et Dispositifs de Sécurité en Fin de Voie:

Les heurtoirs sont des dispositifs placés à l'extrémité des voies de garage ou de sécurité afin de signaler la fin de voie et d'empêcher les véhicules ferroviaires de dépasser cette limite. Ils jouent un rôle essentiel en absorbant l'énergie cinétique des trains grâce à des tampons, ce qui réduit l'impact en cas de collision et protège ainsi le matériel roulant ainsi que les infrastructures.



Figure X-2 Les heurtoirs de sécurités

X.5 Caractéristiques Géométriques des Gares:

X.5.1 La Longueur Utile d'une Voie de Stationnement:

La longueur utile est la distance entre deux garages francs permettant à un train de stationner sans gêner la circulation sur les autres voies. Elle est calculée selon :

Selon la SNTF:

- 426 m pour les trains voyageurs.
- 870 m pour les trains de marchandises.
- 1200 m pour les voies principales des gares voyageuses.

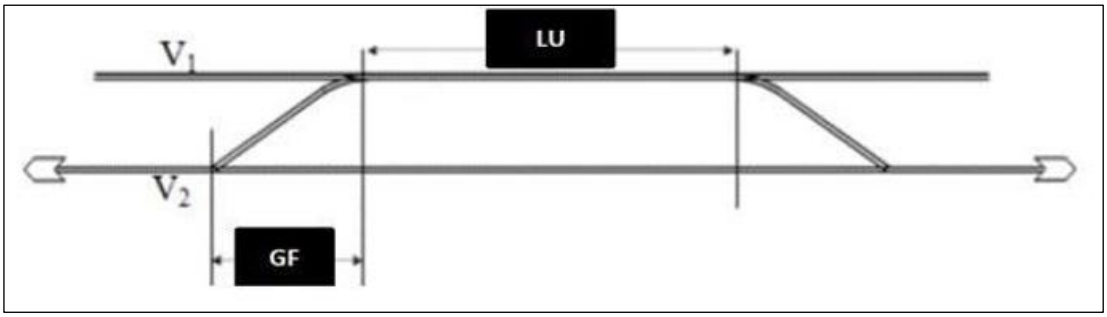


Figure X-3 la longueur utile

X.5.2 Déclivité:

Dans le cadre de notre projet, une déclivité nulle (0‰) a été adoptée afin de garantir une stabilité maximale des trains en stationnement.

X.5.3 Les Appareils de Voie:

X.5.3.1 Règles d'Implantation en Tracé en Plan et profil en long :

Tracé en plan :

- <u>En pointe :</u> La longueur minimale d'alignement L doit être égale à $\frac{Vd}{2}$, où Vd représente la vitesse en km/h de franchissement en voie déviée.
- <u>En talon de la branche déviée :</u>

  → Si la sortie de l'appareil est en alignement, la longueur minimale d'alignement à respecter doit être $\frac{Vd}{2}$.

  → Si la sortie de l'appareil est en courbe :

  - **Si Vd < 100 km/h**, il est recommandé de prévoir une longueur d'alignement égale à $\frac{Vd}{2}$, ou bien de prolonger la courbe de l'appareil par un raccordement progressif.

- **Si 100 ≤ Vd < 160 km/h**, il est conseillé de prolonger la courbe de la voie déviée par un raccordement progressif dans le même sens, pour toute nouvelle configuration.
- **Si Vd ≥ 160 km/h**, cette condition est obligatoire. Quelle que soit la vitesse, la longueur des raccordements doit permettre de limiter la variation maximale d'insuffisance de dévers $\Delta I/\Delta t$ à :
  - **75 mm/s** en condition normale,
  - **90 mm/s** en situation exceptionnelle.

- En talon de la voie directe : La longueur minimale d'alignement L doit être supérieure à 50 m.

Profil en long:

En profil en long, les appareils de voie ne doivent pas se situer à moins de 100 m d'un raccordement ou d'un point de changement de déclivité.

X.5.3.2 Distance Minimale entre Appareils de Voie:

Dans les zones situées proche d'un ouvrage d'art, les appareils de voie situés à des distances minimales qui sont fonction de la longueur **L** de celui-ci :

Tableau X-1 : longueur minimale de l'appareil de voie

Distances minimales	Longueur de l'appareil
≥ 20 m	L ≤ 30 m
≥ 50 m	30 m < L ≤ 90 m

X.6 Alignement Droit Intermédiaire:

Des alignements intermédiaires seront effectués lorsque les appareille situés l'un derrière l'autre forme des itinéraires de courbe et contre courbe la langueur doit être L = 0.1×V (dans notre cas L=12 m) mais pas moins que L=6 m

X.7 Application sur notre projet:

Entraxe entre les voies :

Entraxe entre les voies est de 5 m

Longueur de garage de franc :

On a 2 types des appareils de voie :

- UIC 60-500- 1/12: **GF= (3.57×12) + 1 = 43.84 m**
- UIC 60-300- 1/9: **GF= (3.57×9) + 1 = 33.13 m**

La longueur utile :

Selon le maître de l'ouvrage longueur utile est :

Lu= 2400 m

Voie tiroir = 25 m

X.8 Assainissements:

X.8.1 Assainissement longitudinal:

Les drains longitudinaux à 4 ‰ permettent de recueillir et d'évacuer les eaux infiltrées via un réseau composé de fossés, drains, collecteurs et regards, vers les ouvrages ou lignes d'eau.

X.8.2 Assainissement transversale:

Les surfaces des gares doivent présenter une pente de 4 % (en toit ou en V) pour diriger les eaux pluviales vers les voies, d'où elles sont évacuées par les pentes transversales des plates-formes.

X.9 Conclusion:

La gare de bifurcation est un élément essentiel du réseau ferroviaire, permettant de connecter plusieurs lignes et d'optimiser la circulation des trains. Dans notre projet, elle facilite l'orientation des convois de marchandises vers les zones minières de Gara Djebilet, renforçant ainsi le développement économique régional et l'efficacité du transport ferroviaire national.

SIGNALISATON FERROVIAIRE

XI. CHAPITRE XI : LA SIGNALISATION

XI.1 INTRODUCTION :

La signalisation ferroviaire est un ensemble de tous les signaux et équipements techniques utilisés sur le réseau ferroviaire pour garantie la sécurité des circulations et limiter les risques d'accident. Elle permet de contrôlée les mouvements des trains.

XI.2 LES RISQUES FERROVIAIRES :

- **Collision nez à nez :** entre deux trains quand ils se retrouvent face à face sur la même voie.
- **Collision par rattrapage :** un train entre en collision avec un autre train qui se trouve devant lui.
- **La prise en écharpe** : c'est quand deux trains entrent en collision sur le côté.

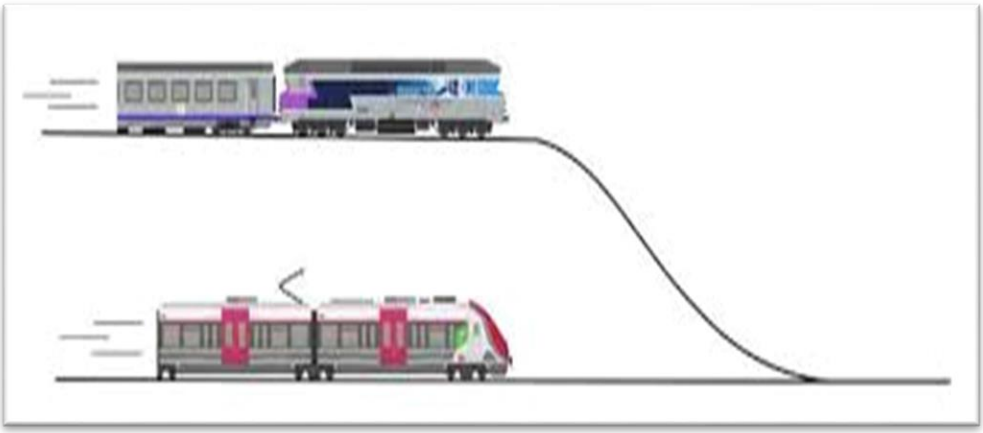


Figure XI-1 : La prise en écharpe de train

- **Une collision avec un obstacle** : c'est la collision avec un objet extérieur, comme une voiture à un passage à niveau.
- **Le déraillement :** est quand un train sort des rails, peut être causé par l'excès de vitesse, une panne du système d'aiguillage, le mauvais état des voies ou du train.

XI.3 LE ROLE DE LA SIGNALISATION :

La signalisation ferroviaire aide à éviter ces risques et :

- ✓ Assurer l'espacement entre les trains pour éviter les rattrapages.
- ✓ Protège les trains dans les endroits où ils peuvent se croiser, comme les gares.
- ✓ Permettre la circulation dans les deux sens sur une même voie en évitant les collisions.
- ✓ Réduire les risques de déraillement.
- ✓ Assurer le franchissement des voies ferrées par des routes où y a des passages à niveau.

XI.4 TYPE DE SIGNALISATION :

Les signaux ferroviaires se partagent en deux catégories :

- Les feux
- Les panneaux

Les signaux sont implantés à gauche de la voie car les trains circulent à gauche**,** ils peuvent être positionné à droite lorsque le positionnement classique n'est pas possible.

XI.4.1 Les feux :

Peuvent être de cinq couleurs différentes :

→ Le rouge et le violet imposent= l'arrêt ou une progression très réduite.

→ Le jaune= commande un ralentissement.

→ Le vert et le blanc =autorisent l'avancement des trains.

XI.4.2 Les blocs :

❖ **Le bloc automatique lumineux (BAL) :**

Les lignes où le trafic ferroviaire est important sont équipé du système de signalisation BAL (bloc automatique lumineux) ce système est entièrement automatique entre deux gares le principe du cantonnement est appliqué de manière à éviter le rattrapage des trains

La ligne est en effet découpée en canton de 1 à 2 km chaque canton est protégé par un signal lumineux composé de trois feux

→ Un vert indique que la voie est libre

→ Un rouge indique l'arrêt des trains appelée sémaphore arrêt

→ Un jaune est un avertissement il indique que le prochain signal est au rouge le train doit donc ralentir pour être en mesure de s'arrêter

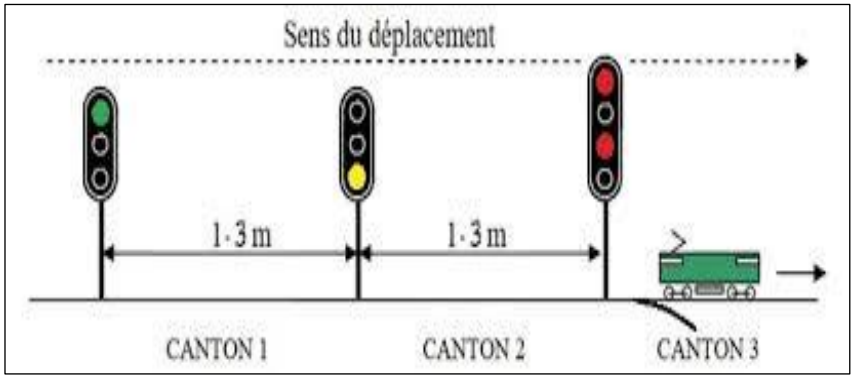


Figure XI-2: Bloc automatique lumineux

Au niveau des bifurcations il faut éviter les collisions et les déraillements un simple sémaphore ne suffit pas car le redémarrage des trains ne doit pas être possible on utilise :

→ Un signal composé de deux feux rouges appelé carré qui indique un arrêt total.

→ Deux feux jaunes horizontaux pour la réduction de vitesse pour un ralentissement

→ Deux feux jaunes verticaux pour un rappel de ralentissement, prend fin dès que le train a franchi l'aiguillage ou le groupe d'aiguillage

→ Les feux verts et jaunes restent valables au niveau des bifurcations et garde la même signification le feu jaune peut se combiner avec les rappels de ralentissement sur

❖ **Le bloc automatique à permissivité restreinte (BAPR) :**

Les lignes où le trafic est moins dense on utilise le bloc automatique à permissivité restreinte (BAPR) ce système est proche du BAL il diffère uniquement par l'organisation du cantonnement. Les cantons peuvent mesurer jusqu'à 25 km.

Le signal de protection de canton est particulier il ne comporte pas d'avertissement seulement un feu vert et un feu rouge précédé par un signal situé environ de 1 km qui affiche l'avertissement.

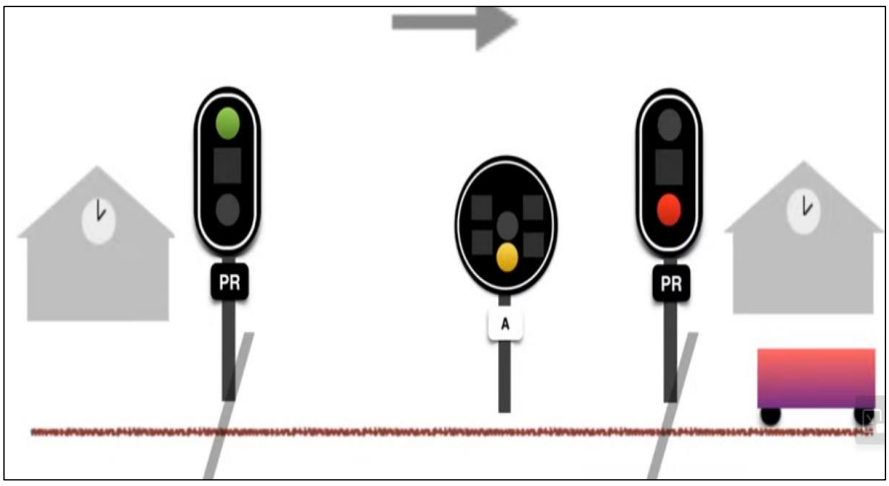


Figure XI-3 : Bloc automatique à permissivité restreinte

❖ **Le bloc manuel (BM) :**

Les lignes à trafic réduit on emploie le bloc manuel (BM) ce système de signalisation est guidé par des agents occupant des postes de cantonnement réparti tout au long d'une ligne ferroviaire. Les signaux utilisés sont les mêmes que BAPR.

❖ **Cantonnement téléphonique :**

Les lignes à très faible trafic la signalisation est souvent remplacée par un système de cantonnement téléphonique parfois assisté par informatique.

❖ **Les voies de manœuvre :**

Possèdent une signalisation lumineuse spécifique :

→ L'arrêt est signifié par un feu violet non franchissable.

→ La voie libre est indiquée par un feu blanc.

→ Un feu blanc clignotant autour quant à lui le départ du train en manœuvre c'est-à-dire sur une distance courte donnant vers une voie de garage.

→ Le feu blanc continue ou clignotant être utilisé depuis une voie principale pour indiquer que le train est dirigé vers une voie de manœuvre.

→ Le disque composé d'un feu jaune et d'un feu rouge sur une ligne horizontale est un signal particulier réservé en très grande majorité au BAPR et au BM ce signal tente à disparaître situer sur les lignes principales, le disque impose une réduction de vitesse à 30 km/h dès que possible ce signal intime aussi l'arrêt qui doit s'effectuer au niveau du prochain signal d'arrêt ou au niveau du premier aiguillage ou gare rencontré s'il n'y a pas de signal d'arrêt.



Figure XI-4 : la signalisation disque

XI.4.3 Les panneaux :

Les signaux lumineux de ralentissement 30 km/h et 60 km/h ne sont pas les seuls moyens d'indiquer une limitation de vitesse à l'approche d'un aiguillage on utilise des panneaux mobiles et fixe.

1) Panneaux mobiles :

❖ **Tableau indicateur de vitesse à distance (TIVD) :**

Tableau indicateur de vitesse à distance permet d'annoncer une limitation de vitesse à distance.

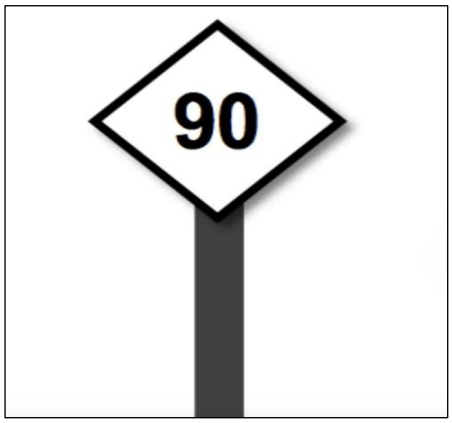


Figure XI-5 : Tableau indicateur de vitesse à distance

❖ **Tableau indicateur de vitesse (TIV) :**

C'est un rappel de limitation forme de carré nommé des franchissements de l'aiguillage ou dés aiguillage la limitation prend fin.

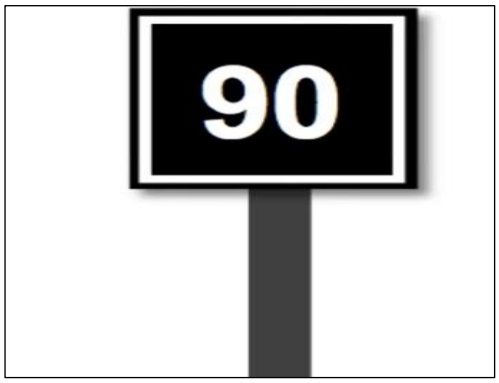


Figure XI-6 : tableau indicateur de la vitesse (TIV)

2) Panneaux fixes :

→ Tableau indicateur de vitesse à distance (TIVD) pour protéger en permanence une section de ligne, la limitation prend effet à l'aiguillage abordé ou au niveau d'un panneau Z et se termine des franchissements de l'aiguille ou au niveau d'un panneau R

→ La limitation s'applique à un point kilométrique particulier éventuellement indiqué par un panneau

→ Les TID simples peuvent être complétés par des demi-cercles qui indiquent une limitation de vitesse pour un certain type de train

→ **Les TIVD :**

- Type B : s'adressent au train autorisé à dépasser la vitesse de 140 km par heure.

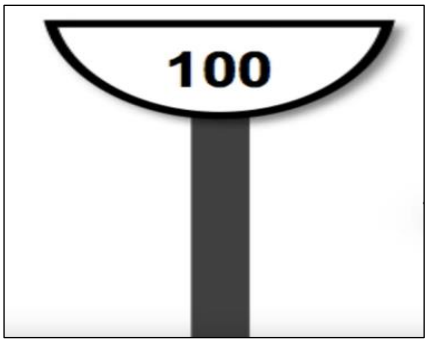


Figure XI-7 TIVD de type B

- Type C : s'adressent aux automoteurs.

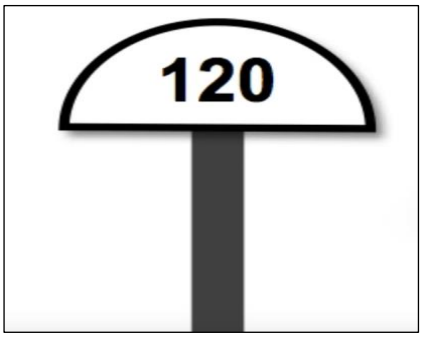


Figure XI-8 TIVD de type c

→ TIVD et TIV dit pentagonaux qui s'applique aux trains de marchandise**.**

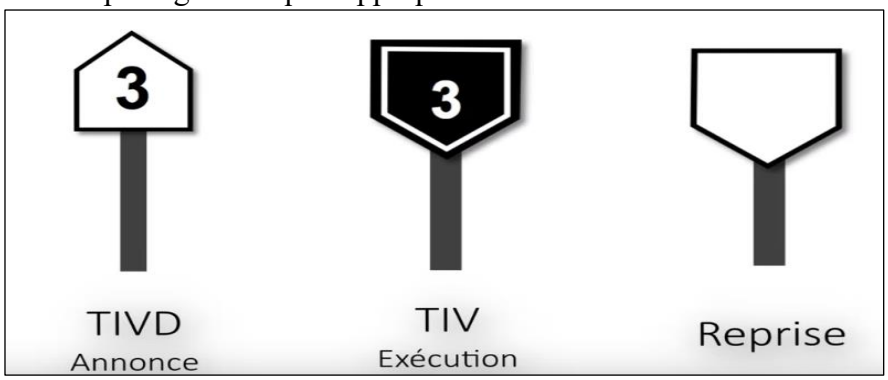


Figure XI-9 TIVD et TIV

❖ **Les indicateurs de direction à distance** : donnent la direction grâce à des feux blancs groupés avec un signal de protection d'aiguillage

→ Un feu blanc indique la direction à gauche.

→ Trois feux blanc la direction à droite.

XI.5 LE SYSTÈME ERTMS (EUROPÉEN TRAFIC MANAGEMENT SYSTEM) :

L'ERTMS est un système de signalisation numérique qui permet de connaître à tout moment la position des trains et leur vitesse. Le dispositif indique au conducteur sur son écran de conduite la vitesse maximum qu'il doit respecter en fonction des caractéristiques de son train.

XI.5.1 Les composantes d'ERTMS :

L'ERTMS est composé de deux éléments majeurs et d'un troisième optionnel :

- **L'ETCS (Européen Train Control System) :** permet un passage optimisé des frontières en garantissant la sécurité des installations.
- **Le GSM-R** est le système radio utilisé pour échanger des informations entre le sol et le bord.
- **L'ATO (Automatic Train Opérations)** : ce dispositif optionnel est un système permettant la traction et le freinage automatique du train.

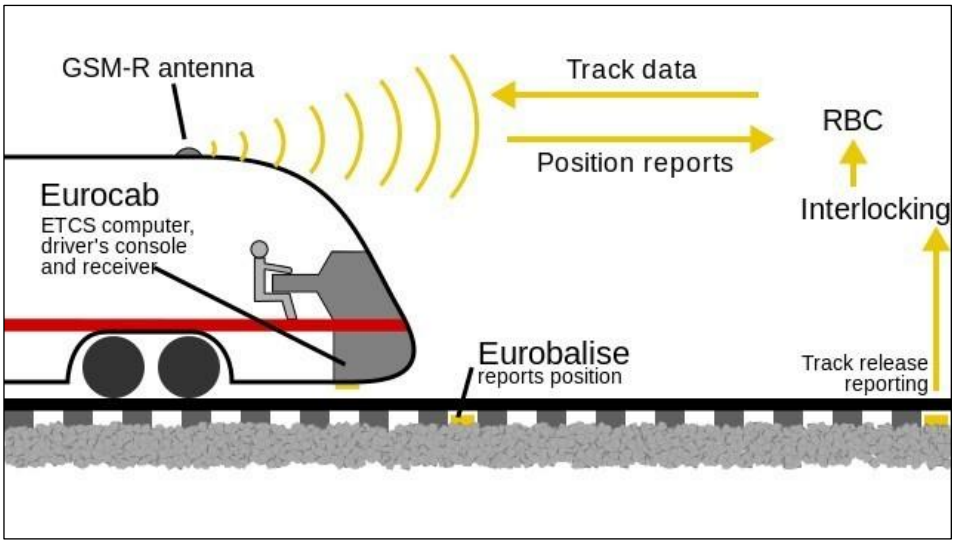


Figure XI-10 Les composantes d'ERTMS

XI.5.2 Implantation d'ERTMS :

La mise en œuvre de l'ERTMS nécessite l'installation d'équipements :

- **Le Radio Block Centre (RBC) :** c'est l'ordinateur central du système ERTMS connecté aux installations au sol et communique avec le train via le réseau GSM-R. Il reçoit la position du train et affichées au conducteur les autorisations de mouvement et les vitesses à respecter.
- **Les eurobalises :** sont des dispositifs installés entre les rails qui transmettent des informations aux trains et transmettre des données telles que des autorisations de mouvement ou des restrictions de vitesse.
- **Les antennes GSM-R :** est un système de radio permettant de communiquer avec le RBC (pour les échanges de données) et les postes de signalisation et de régulation (par dialogue radiotéléphonique entre le conducteur et les équipes au sol)

XI.5.3 Les niveaux de ERTMS:

- Le **niveau 1** utilise des balises au sol et conserve la signalisation latérale traditionnelle.

- Le **niveau 2** remplace la signalisation par une communication radio continue (GSM-R) entre le train et un centre de contrôle (RBC).

- Le **niveau 3** supprime les circuits de voie et utilise des cantons mobiles, avec un contrôle d'intégrité embarqué dans le train.

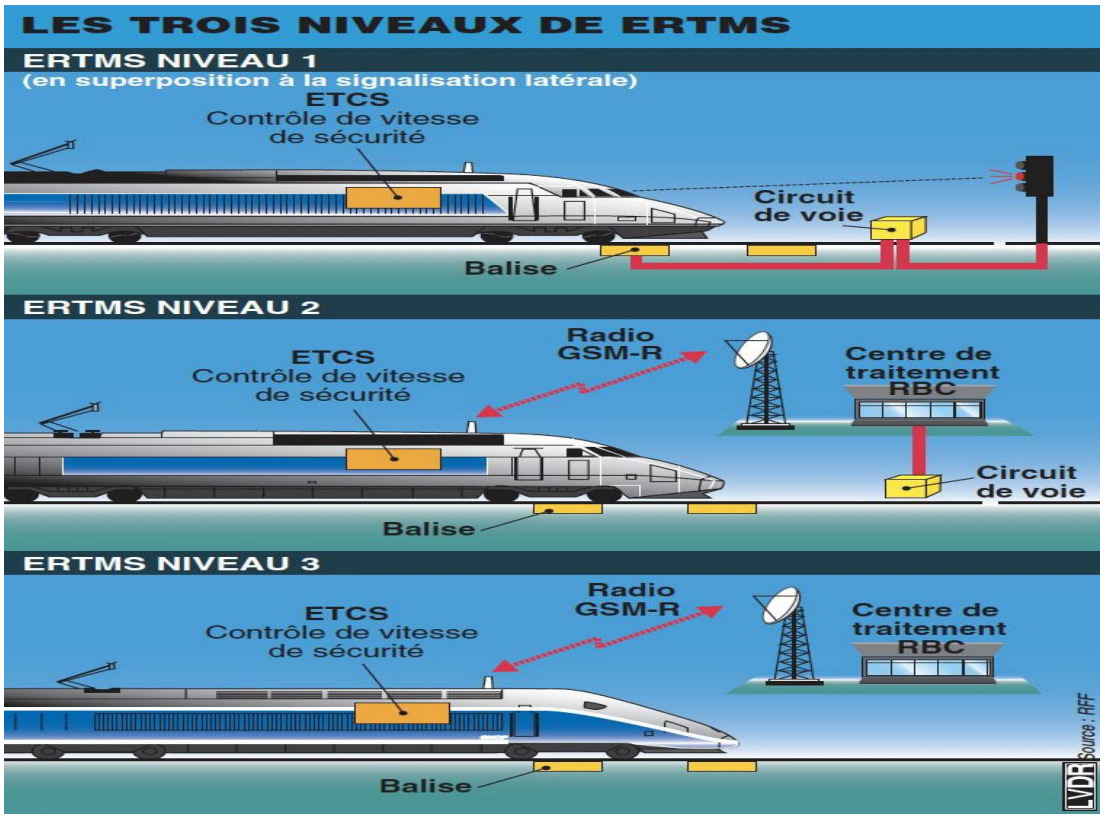


Figure XI-11 les niveaux de ERTMS

XI.6 Application pour notre projet

Le système de signalisation pour notre projet doit assurer :

- La circulation des trains à la vitesse max de 120 km/h.
- Assurer que par cette ligne pourra circuler un nombre suffisant de véhicules pour couvrir la demande prévue de passagers et de marchandises.
- Faciliter l'exploitation de la ligne
- Appliquer un système de commande centralisée de l'exploitation

XI.7 Conclusion:

La signalisation ferroviaire est indispensable pour garantir la sécurité et la fluidité des circulations. Elle permet de prévenir les accidents et de gérer efficacement le trafic, même sur des lignes à forte fréquentation. L'intégration de systèmes modernes comme l'ERTMS améliore la supervision et la sécurité des trains. Pour notre projet, un système adapté assurant vitesse, capacité et exploitation centralisée est essentiel au bon fonctionnement de la ligne.

ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

XII. CHAPITRE XII: ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT :

XII.1 INTRODUCTION:

Le projet ferroviaire dans la région de Tindouf peut avoir des impacts sur l'environnement naturel et les populations locales. Il est important d'identifier ces effets pour mieux les gérer. Cette étude analyse ces impacts et propose des mesures pour limiter les conséquences négatives, afin de garantir un développement durable qui respecte à la fois la nature et les habitants.

XII.2 IMPORTANCE DE L'ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT:

L'étude d'impact sur l'environnement est une étape essentielle dans la conception de tout projet d'infrastructure, en particulier pour les projets à grande échelle comme une ligne ferroviaire. Elle permet d'identifier, dès les premières phases de planification, les effets que le projet pourrait avoir sur l'environnement naturel, humain et socio-économique.

Cette démarche vise à anticiper les impacts directs ou indirects, temporaires ou permanents, que le projet pourrait engendrer, afin de proposer des solutions adaptées pour les éviter, les réduire ou les compenser. Elle permet également de mettre en valeur les effets positifs que le projet peut apporter, comme l'amélioration des infrastructures locales ou la création d'emplois.

L'objectif principal de cette évaluation est de garantir un développement durable. Elle aide le maître d'ouvrage à concevoir un projet respectueux de l'environnement, tout en fournissant aux autorités compétentes les éléments nécessaires pour prendre des décisions éclairées. Enfin, elle joue un rôle clé dans l'information du public, en assurant la transparence et en permettant aux citoyens de mieux comprendre les enjeux environnementaux liés au projet.

XII.3 DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT EXISTANT:

Milieu	Description résumée	
Milieux physique	**Climat**	Climat désertique avec étés très chauds (>40°C) et hivers froids (min 7°C)
	Géomorphologie	Zone variée entre massif calcaire (djebel Ouarkziz), plateau désertique (Hamada de Tindouf) et sebkhas (Tindouf, Ain Belbela).
	Géotechnique	Études géotechniques réalisées pour identifier nature des sols et dimensionner la plateforme ferroviaire.
	Hydrologie	La Ligne traverse plusieurs bassins versants du Sahara.
	Sismologie	Zone sismique de niveau 0 (très faible risque).

	Vent	Vents dominants ouest puis sud-ouest, vitesse moyenne 16 km/h, rafales >35 km/h, pouvant causer tempêtes de sable.
Milieu biologique	**Faune**	Faune domestique (chameaux, chèvres) et sauvage (fennec, guépard saharien, vipère, gazelles)
	Flore	Végétation steppique et arbustive, palmiers dattiers, plantes épineuses
Milieu socio-économique	**Démographie**	Population estimée à 97 578 habitants en 2019, forte croissance depuis 1998 (taux annuel 6,3 %)**[10]**.
	Agriculture	Activité limitée malgré terres vastes, faible irrigation (94 % de la SAU), climat aride et ressources hydriques faibles.
	Économie	Présence de gisements de fer importants à Gara Djebilet et Mechri Abdelaziz (400 km à l'est).
Infrastructure de transport	**Réseau routier**	Route nationale RN50 relie Tindouf à Béchar, axe principal de communication.
	Réseaux aéroportuaires	Aéroport régional moderne, capacité 400 personnes et deux avions, liaison avec grandes villes du pays.

XII.4 ANALYSE DES IMPACTS DU PROJET SUR L'ENVIRONEMENT ET MESURES PRISES POUR LES MINIMISER :

XII.4.1 Impacts pendant la phase de réalisation

Sur le milieu humain:

- Bruit et vibrations causés par les machines et engins, perturbant les activités agricoles et pastorales.
- Difficultés d'accès et interruptions sur les routes, notamment la RN50, affectant les déplacements des habitants, l'accès aux terres agricoles et le passage des troupeaux.
- Possible dégradation temporaire de la qualité de l'air.

Sur le milieu physique:

- Dégradation des sols par érosion, tassement et décapage des couches superficielles.
- Risque de pollution des oueds et nappes en cas de fuites ou déversements accidentels.
- Détérioration visuelle temporaire du paysage et impact sur la végétation.

Sur la faune et la flore :

- Perturbation des habitats naturels, déplacement ou disparition temporaire de certaines espèces.
- Pression accrue sur la biodiversité locale liée à l'intensité des travaux.

XII.4.2 Mesures prise :

- Limitation des émissions de poussières par arrosage et contrôle de la vitesse des engins.
- Entretien régulier des équipements pour réduire bruit.
- Contrôle des fuites et déversements pour préserver la qualité des eaux.

XII.4.3 Impacts pendant la phase d'exploitation:

Impacts positifs:

- Sécurisation et amélioration du transport du minerai de fer.
- Meilleure rentabilité pour la Société nationale de transport ferroviaire.
- Développement urbain autour des nouvelles gares.
- Renforcement de la liaison Nord–Sud du pays.

Impacts négatifs :

- Exposition aux champs électromagnétiques générés par l'alimentation électrique de la ligne.
- Dangers électriques, présence de courants de hautes tensions proches des zones habitées, risques pour les habitants et la faune.
- Instabilité des talus liée aux terrassements

XII.4.4 Mesures prise:

- Entretien régulier des infrastructures ferroviaires pour limiter les risques et prolonger leur durée de vie.
- Formation du personnel à la sécurité et à la gestion environnementale.
- Re-végétation avec des espèces locales pour compenser les pertes écologiques.
- Surveillance de la qualité des eaux et contrôle des fuites d'hydrocarbures ou produits dangereux.
- Aménagement de passages pour la faune afin de préserver la biodiversité.

XII.5 CONCLUSION:

Dans ce chapitre, nous avons montré que le tronçon ferroviaire entre le PK 795+000 et le PK 821+000 a un impact environnemental limité, grâce aux mesures de protection mises en œuvre. Ce projet contribue au développement durable de la région tout en préservant l'équilibre écologique.

DEVIS ESTIMATIF ET QUANTITATF

XIII. 0CHAPITRE XIII: DEVIS ESTIMATIF ET QUANTITATIF:

Désignation des tâches	U	PU	Marché	
			Quantité	Montant
INSTALLATION DE CHANTIER ET ETUDE D'EXECUTION				
Installation général du chantier	F	**444 331 022.33**	1.000	**553 685 891.91**
Étude d'exécution des terrassement	F	**156 000 000.00**	1.000	**156 000 000.00**
			Prix totale :	**709 685 891.91**
TERRASEMENTS GENERAUX				
Decapage de terre vegetale	M3	**750.00**	**113 568.000**	85 176 000.00
Déblais rocheux non rippables ou avec emploi d'explosif, prédécoupage, mise en dépôt	M3	**2 300.00**	846 219.290	1 946 304 367.00
Mise en remblai de terrain issu de lieux d'emprunt	M3	**676.20**	2 737 062.460	1 850 801 635.45
			Prix totale :	**3 882 282 002.00**
ASSISE FERROVIAIRE				
Fourniture et mise en œuvre de la couche de forme	M3	**1 500.00**	88 532.540	132 798 810.00
Fourniture et mise en œuvre de la couche de fondation	M3	**1 900.00**	46 032.520	87 461 788.00
Fourniture et mise en œuvre de la couche de s/ballast	M3	**3 341.80**	42 718.040	142 755 146.07
Matériaux drainant	M3	**3800**	20352.55	77 339 690
Enrochement	M3	**1200,00**	72960,88	87 553 056
Fourniture et pose géotextile	M3	**1 628.86**	60368,00	98 354 126.48
			Prix totale :	**626 262 616.55**

OUVRAGES HYDRAULIQUE				
Buses de tuyaux en béton armé diamètre 1500mm	ML	**17 000.00**	100.000	1 700 000.00
Fossés trapézoïdaux en béton armé	M3	**4 720.00**	8 347.680	39 401 049.60
Dalot en béton armé coupe transversale 3X 2 m/2 cellule	M^3	**47000**	201.480	9 469 560.00
			Prix totale :	**50 570 609.60**
TRAVAUX DE LA VOIE				
Ballastage	M3	**4500**	66 336.900	298 516 050.00
Fourniture des rails NEUFS UIC 60 (60,34 kg/m)	Tonne	**23692**	3 130.920	74 177 756.64
Fourniture des attachés pour rails UIC 60 (vossloh)	U	**523.8**	173 336.000	90 793 396.80
Pose de la voie	ML/V	**5626**	52 000.000	292 552 000.00
Fourniture des traverses monobloc M450	U	**25000**	43 334.000	1 083 350 000.00
Fourniture des appareils de voie simples UIC 60 300-1/9	U	**12626324.23**	7.000	88 384 269.61
Fourniture des appareils de voie simples UIC 60 500-1/12	U	**15899976.16**	4.000	63 599 904.64
Pose des appareils de voie simples UIC 60-300 1/9	U	**543302.82**	7.000	3 803 119.74
Pose des appareils de voie simples UIC 60-500 1/12	U	**614526.52**	4.000	2 458 106.08
Soudage électrique	F	**1407**	2 708.330	3 810 620.31
Soudage aluminothermique	U	**15000**	180.556	2 708 333.33
Heurtoir	U	**936686.56**	2.000	1 873 373.12
			Prix totale :	**2 214 450 055.96**

OUVRAGES				
Passage inferieur	U	142759231	1.000	142 759 230.96
VIADUC 1	U	956164996.200	1.000	956164996.20
VIADUC 2	U	**2 071 690 825.00**	1.000	2 071 690 825.00
			Prix totale :	**3 170 615 052.16**
AMENAGEMENT EXTERIEUR DE LA GARE				
Réalisation des travaux d'aménagement de la gare de Bifurcation	F	1	15,000,000.00	15000
			Prix totale :	**15 000.00**
SIGNALISATION				14 800 000.00
MONTONT DU PROJET (HT)				**10 668 681 228.18**
MONTANT DE TVA (19%)				**2 027 049 433.35 DA**
MONTANT EN (TTC)				**12 695 730 661.53DA**

Montant total du projet en TTC :

Douze milliards six cent quatre-vingt-quinze millions sept cent trente mille six cent soixante et un dinars et cinquante-trois centimes.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE:

Le présent mémoire a porté sur l'étude d'avant-projet détaillé (APD) d'un tronçon de la future ligne ferroviaire minière reliant Tindouf à Gara Djebilet, couvrant la section comprise entre les PK 795+000 et PK 821+000. Ce projet s'inscrit dans une démarche stratégique visant à renforcer les infrastructures de transport dans le sud-ouest algérien, en particulier pour l'exploitation et l'exportation des importantes ressources minières de la région.

Tout au long de cette étude, plusieurs volets techniques ont été abordés, allant de l'étude géométrique du tracé (plan et profil en long), à l'analyse hydrologique et géotechnique, en passant par la conception des profils en travers, la superstructure ferroviaire, la signalisation, ainsi que l'évaluation des impacts environnementaux. Un accent particulier a été mis sur la conception d'une gare de bifurcation adaptée aux exigences logistiques du transport de marchandises.

Les résultats obtenus ont permis de proposer des solutions techniquement viables et adaptées aux contraintes du site, notamment en matière de topographie, de climat désertique, de gestion des crues dans les zones inondables, et d'optimisation des coûts. Les choix techniques retenus visent à garantir la durabilité de l'infrastructure, tout en respectant les normes en vigueur et les exigences de sécurité ferroviaire.

Ce travail a également été l'occasion de mobiliser et d'approfondir les connaissances acquises durant la formation en TP, tout en développant un sens critique et une capacité d'adaptation face aux contraintes du terrain. Il constitue une contribution modeste, mais concrète, à la mise en valeur des vastes potentialités économiques du Sahara algérien par le biais d'un développement durable et structurant.

En définitive, ce mémoire ouvre la voie à des approfondissements ultérieurs, notamment en matière d'études d'exécution, de modélisation hydrologique plus poussée, ou encore d'analyse socio-économique de l'impact du projet. Il constitue une base solide pour les phases suivantes de réalisation, en mettant l'accent sur la rigueur technique, la cohérence des choix, et la vision intégrée du développement régional.

BIBLIOGRAPHIE:

[1] Organisation internationale des chemins de fer (UIC)-*UIC 719 R : Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaire (3e éd.)*. UIC.

[2] Organisation internationale des chemins de fer (UIC)-*UIC 714 : Classification des voies des lignes. UIC.*

[3] Société nationale des transports ferroviaires (SNTF). (2005). *Référentiel technique, chap. 6 : Géométrie de la voie*.

[4] SETIRAIL- *Rapport de l'étude géologique et géotechnique.* SETIRAIL.

[5] SETIRAIL-*Rapport de l'étude hydrologique et*. SETIRAIL.

[6] Sétra. (2006, octobre). *Guide technique : Assainissement routier*. Ministère de l'Équipement.

[7] Société nationale des transports ferroviaires (SNTF)-*Référentiel technique, version 02, chap. 7.2.2 – Ouvrages en terre pour plateformes ferroviaires*.

[8] Société nationale des transports ferroviaires (SNTF)-*Chapitre 10 : Signalisation et télécommunication*.

Morsli, R-*Cours voie ferrée*. École nationale supérieure des travaux publics (ENSTP).

Site web :

[9] UNICEM-*Comment sont construites les voies de chemin de fer grâce à la pierre ?* **https://www.unicem.fr/article/la-vie-en-pierre/comment-sont-construites-les-voies-de-chemin-de-fer-grace-a-la-pierre/** Consulté le 10/04/2025

[10] Ministère de l'Intérieur et des Collectivités Locales. *Monographie de la wilaya de Tindouf*. **https://interieur.gov.dz/Monographie/article_detail.php?lien=1490&wilaya=37** Consulté le 29/05/2025

[11] https://www.carte zonage sismique algerie - Recherche Images (bing.com),consulté en ligne le 03/03/2025

Annexe A: Listing tracé en plan

Elément	Caractéristiques	Longueur	Abscisse	X	Y
			795+000	596242.0494	3076300.8492
Droite1	ANG=212.1469 (g)	2219.031			
			797+219	595821.2142	3074122.0888
Clothoide1	A=316.228				
	R=2000.000	50.000			
			797+269	595811.5274	3074073.0365
Arc3	XC=593852.7177				
	YC=3074476.8488				
	R=2000.000	1794.062			
			799+063	594759.3135	3072694.1307
Clothoide2	A=316.228				
	R=2000.000	50.000			
			799+113	594714.5585	3072671.8381
Droite5	ANG=270.8452 (g)	2492.730			
			801+606	592478.6905	3071569.7503
Clothoide6	A=316.228				
	R=2000.000	50.000			
			801+656	592433.9356	3071547.4577
Arc7	XC=593340.5314				
	YC=3069764.7396				
	R=2000.000	2133.877			
			803+790	591341.6466	3069831.5192
Clothoide8	A=316.228				
	R=2000.000	50.000			
			803+840	591340.3936	3069781.5352
Droite9	ANG=201.3303 (g)	15523.757			
			819+363	591016.0325	3054261.1669
Clothoide10	A=316.228				
	R=2000.000	50.000			
			819+413	591015.1961	3054211.1742
Arc11	XC=593015.1256				
	YC=3054194.3824				
	R=2000.000	225.549			
			819+639	591026.0106	3053986.0038
Clothoide12	A=316.228				
	R=2000.000	50.000			
			819+689	591031.6343	3053936.3214
Droite13	ANG=192.5593 (g)	1274.260			
			820+963	591180.2293	3052670.7551

Listing profil en long :

Elément	Caractéristiques des éléments	Longueur	Abscisse	Z
			795+000	430.709
D1	PENTE= 0.05%	2977.513		
			797+978	432.200
ARC1	S= 798+000 Z=432.211			
	R= -30000.000	44.975		
			798+022	432.256
D2	PENTE= 0.20%	1887.489		
			799+910	436.031
ARC2	S= 800+000 Z=436.211			
	R= -30000.000	179.999		
			800+090	435.851
D3	PENTE= -0.40%	1195.035		
			801+285	431.071
ARC3	S= 801+300 Z=431.011			
	R= -15000.000	30.000		
			801+315	430.981
D4	PENTE= -0.20%	1235.878		
			802+551	428.509
ARC4	S= 802+611 Z=428.389			
	R= -30000.000	119.997		
			802+671	428.029
D5	PENTE= -0.60%	3889.118		
			806+560	404.694
ARC5	S= 806+650 Z=404.154			
	R= -30000.000	179.997		
			806+740	404.154
D6	PENTE= 0.00%	2675.173		
			809+415	404.154
ARC6	S= 809+460 Z=404.154			
	R= -15000.000	89.998		
			809+505	403.884
D7	PENTE= -0.60%	495.315		
			810+000	400.913
D8	PENTE= -0.60%	2621.516		
			812+622	385.184
ARC8	S= 812+700 Z=384.716			
	R= -30000.000	155.997		
			812+778	384.653
D9	PENTE= -0.08%	1202.001		
			813+980	383.692

ARC9	S= 814+000 Z=383.676			
	R= -50000.000	40.000		
			814+020	383.676
D10	PENTE= 0.00%	4450.000		
			818+470	383.676
ARC10	S= 818+500 Z=383.676			
	R= -30000.000	60.000		
			818+530	383.736
D11	PENTE= 0.20%	1444.500		
			819+975	386.625
ARC11	S= 820+000 Z=386.676			
	R= -30000.000	51.000		
			820+025	386.683
D12	PENTE= 0.03%	924.769		
			820+950	386.961

Annexe B

Canalisation circulaire partiellement remplie

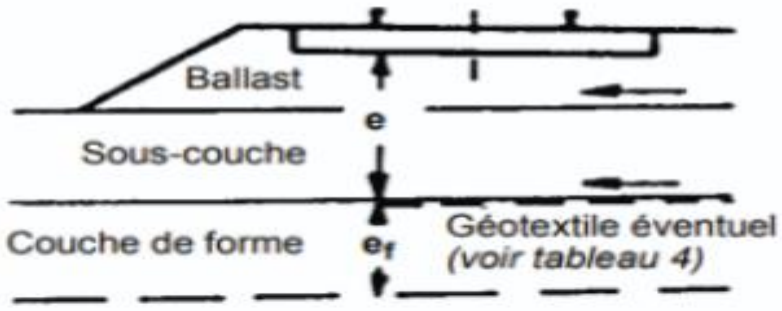
Q / Q p s	V / V p s	h /D	Q / Q p s	V / V p s	h /D
0,0 0 1	0,1 4	0,0 2	0, 5 3 4	1, 0 2	0, 5 2
0, 0 0 3	0,2 2	0,0 4	0, 5 6 8	1, 0 3	0, 5 4
0, 0 0 7	0, 2 9	0,0 6	0, 6 0 3	1, 0 5	0, 5 6
0, 0 1 3	0, 3 5	0,0 8	0, 6 3 7	1, 0 6	0, 5 8
0, 0 2 1	0, 4 0	0,1 0	0, 6 7 2	1, 0 7	0, 6 0
0, 0 3 1	0, 4 5	0,1 2	0, 7 0 6	1, 0 8	0, 6 2
0, 0 4 2	0, 5 0	0,1 4	0, 7 4 0	1, 0 9	0, 6 4
0, 0 5 6	0, 5 4	0,1 6	0, 7 7 3	1, 1 0	0, 6 6
0, 0 7 1	0, 5 8	0,1 8	0, 8 0 6	1, 1 1	0, 6 8
0, 0 8 8	0, 6 2	0,2 0	0, 8 3 7	1, 1 2	0, 7 0
0, 1 0 6	0, 6 5	0,2 2	0, 8 6 8	1, 1 3	0, 7 2
0, 1 2 6	0, 6 8	0,2 4	0, 8 9 8	1, 1 3	0, 7 4
0, 1 4 8	0, 7 2	0,2 6	0, 9 2 6	1, 1 4	0, 7 6
0, 1 7 1	0, 7 5	0,2 8	0, 9 5 3	1, 1 4	0, 7 8
0, 1 9 6	0, 7 8	0,3 0	0, 9 7 7	1, 1 4	0, 8 0
0, 2 2 2	0, 8 0	0,3 2	1, 0 0 0	1, 1 4	0, 8 2
0, 2 4 9	0, 8 3	0,3 4	1, 0 2 1	1, 1 4	0, 8 4
0, 2 7 7	0, 8 6	0,3 6	1, 0 3 9	1, 1 4	0, 8 6
0, 3 0 7	0, 8 8	0,3 8	1, 0 5 4	1, 1 3	0, 8 8
0, 3 3 7	0, 9 0	0,4 0	1, 0 6 6	1, 1 2	0, 9 0
0, 3 6 8	0, 9 2	0,4 2	1, 0 7 3	1, 1 2	0, 9 2
0, 4 0 0	0, 9 4	0,4 4	1, 0 7 6	1, 1 0	0, 9 4
0, 4 3 3	0, 9 6	0,4 6	1, 0 7 1	1, 0 9	0, 9 6
0, 4 6 6	0, 9 8	0,4 8	1, 0 5 7	1, 0 6	0, 9 8
0, 5 0 0	1, 0 0	0,5 0	1, 0 0 0	1, 0 0	1, 0 0

Annexe C

Classification du sol pour la plateforme (selon UIC):

Classe de qualités des sols	**Classification des sols (identification géotechnique)**
QS0 : Sols impropres	0.1 sols organiques. 0.2 sols fins (comportant plus de 15% de fines) foisonné, humides et donc non compactables. 0.3 sols comportant des matériaux solubles (sel gemme ou gypse) 0.5 sols comportant des matériaux polluants (déchets industriels par exemple). 0.6 sols mixtes « minéraux organique ».
QS1 : Sols médiocres	1.1 Sols comportant plus de 40 % de fines (sauf sols0.2). 1.2 Roches très évolutives par exemple : - Craies de ρd <1.7t/m^3 et de friabilité forte – Marnes - Schistes altérés. 1.3 Sols comportant de 15 à 40 % de fines (sauf sols 0.2). 1.4 Roches évolutives par exemple : - Craies de ρd < 1.7 <t/m3 et de friabilité faible - Schistes non altérés. 1.5 Roches tendres par exemple : Si Microdeval en présence d'eau (MDE)>40 et Los Angeles LA>40.
QS2 : Sols moyens	2.1 Sol comportant de 5 à 15% de fines. 2.2 Sols comportant moins de 5% de fines mais uniformes (Cu≤6). 2.3 Roches moyennement dures par exemple : Si 25<MDE≤40 et 30<LA<40.
QS3 : Bons sols	3.1 Sols comportant moins de 5% de fines 3.2 Roches dures par exemples : Si MDE≤25 et LA≤30

Annexe D



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

(e en mètres)

E	= 0,70 m	pour les plates-formes de classe de portance P_1
E	= 0,55 m	pour les plates-formes de classe de portance P_2
E	= 0,45 m	pour les plates-formes de classe de portance P_3
a	=0	pour les groupes UIC 1 et 2 (ou lignes à V ≥ 160 km/h quel que soit le groupe UIC)
a	= - 0,05 m	pour les groupes UIC 3 et 4
a	= - 0,10 m	pour les groupes UIC 5, 6 et 7, 8, 9 avec voyageurs
a	= - 0,15 m	pour les groupes UIC 7, 8, 9 sans voyageur'
b	= 0	pour les traverses bois de longueur 2,60 rn
b	= (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	=-010 m	à titre exceptionnel pour des opérations difficiles sur les lignes existantes de groupe UIC "7, 8, 9 sans voyageur
c	=-0 05 m '	à titre exceptionnel pour des opérations difficiles sur les lignes existantes de groupe UIC autre que"7, 8, 9 sans voyageur"
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 à V ≤ 1 60 km/h et pour les plates-formes de portance P_3 des lignes à grande vitesse.
f	=+ 0,05 m	pour les plates-formes de classe de portance P_2 des lignes à grande vitesse.
f	=+ 0, 1 0 m	pour les plates-formes de classe de portance P_1 des lignes à grande vitesse
g	=+ géotextile	lorsque la couche de forme est en sol QS_1 ou QS_2
g	= 0 (pas de géotextile)	lorsque la couche de forme est en sol QS_3

Annexe E

FICHE 7 de la norme ST N°590 « Matériaux de zone inondable

Type de matériau : CiB3 , D3 , R21 , R22 , R41 , R42 , R61 , R62 , F31 , F71

désignation		Granulat 0/D	Observations
Caractéristiques intrinsèques			
résistance	LA+MDA	<= 80	
Caractéristiques de fabrication			
dimensions nominales	d	0	
	D	63 à 500	
granularité	P[Dmax]	>= 99 %	
(fuseau de spécification)	P[D]	[1]	
	P[D/20]		
	P[0,08]	<= 5 %	[2]
angularité			
forme			
propreté			
Caractéristiques complémentaires			
sensibilité au gel		non gélif	
dégradabilité		non mesurable	
granulats artificiels		[3]	

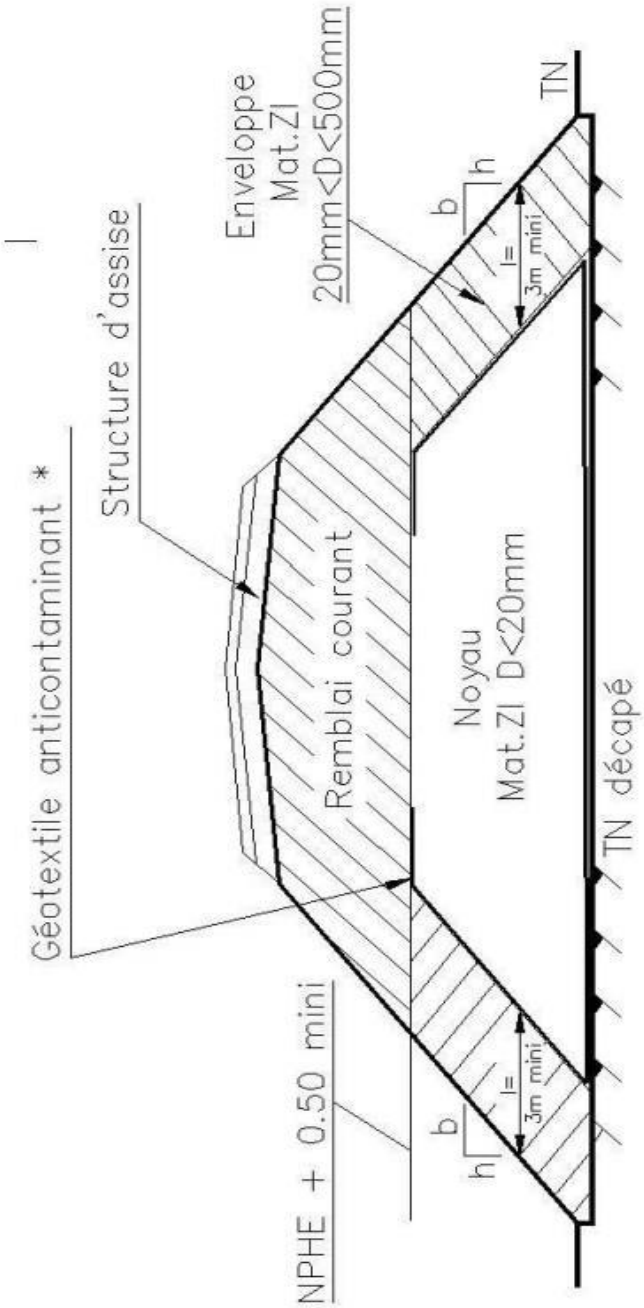
[1] si D <= 200 mm : P[D] = 99 à 85 % (Dmax = 1,25 D)
si D > 200 mm : P[D] >= 99 % (D = Dmax)

[2] mesuré sur la fraction 0/50

[3] voir recommandations d'emploi en annexes 1 et 2

Annexe F

Annexe 7 – Remblai de zone inondable avec noyau et enveloppe



Le NPHE (niveau des plus hautes eaux) est déterminé par l'étude hydraulique

* Si les conditions de Terzaghi ne sont pas respectées entre les matériaux du noyau et ceux de l'enveloppe