



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت - بلحاج بوشعيب

Université Ain Témouchent - Belhadj Bouchaib

Faculté des sciences et de Technologie

Département de Génie Civil et Travaux Publics

Projet de Fin d'études pour obtenir le diplôme de master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie civil & Travaux Publics

Spécialité : Matériaux

Thème :

**Étude Avant-Projet détailler (APD) de la nouvelle ligne
Ferroviaire Béchar — Gara Djebilet (Tindouf) sous
tronçon PK 740+000 au PK 750+000**

Réalisé par :

- BOUTOUBA ABDELAZIZ
- BOUASRIA ZOUAOUI

Devant les jurys composés de :

- | | | |
|-------------------------------|------------------------|------------|
| • Mme. ABDELBARI Salima | U.B.B (Ain Témouchent) | Président. |
| • Mme. MOHAMMED BELHADJ Ahlem | U.B.B (Ain Témouchent) | Encadreur. |
| • Mme. BELABACI Zineb | U.B.B (Ain Témouchent) | Examineur |

Année Universitaire : 2025/2026

DÉDICACE

Nous dédions ce modeste travail à nos chers parents, source de tendresse et d'amour inépuisable, pour leurs sacrifices et leur soutien tout au long de notre parcours.

À nos familles, à nos amis proches et à tous ceux qui nous ont encouragés, soutenus et motivés durant ces années d'études.

À tous les ingénieurs qui œuvrent chaque jour pour le développement de l'infrastructure ferroviaire algérienne.

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la volonté, la patience et la santé nécessaires pour accomplir ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrante Madame MOHAMMED BELHDJ AHLEM pour sa disponibilité permanente, ses orientations précieuses, ses conseils avisés et son encadrement rigoureux tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos sincères remerciements vont également aux membres du jury qui ont bien voulu consacrer leur temps à l'évaluation de ce travail.

Nous remercions l'ensemble du corps enseignant du Département de Génie Civil de l'Université Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent, et plus particulièrement les enseignants de la filière VOA, pour la qualité de la formation dispensée.

Enfin, nous adressons nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

RÉSUMÉ

Ce Projet de Fin d'Études présente l'étude d'Avant-Projet Détaillé (APD) du tronçon PK 740+000 au PK 750+000 de la nouvelle ligne ferroviaire stratégique reliant Béchar à Gara Djebilet (Tindouf). L'objectif majeur de cette infrastructure minière et de transport est de désenclaver la région et de permettre l'acheminement à grande échelle du minerai de fer. S'inscrivant dans la spécialité Matériaux, ce travail porte sur le dimensionnement rigoureux du corps de la voie (rail, traverses, ballast et sous-couches) et l'évaluation géotechnique des plateformes en milieu saharien. L'analyse intègre les spécifications techniques internationales (fiches UIC 719 R et 720 R, normes EN 13674 et EN 13230) adaptées aux contraintes climatiques et géomorphologiques extrêmes du Sud algérien, caractérisées par de grands écarts thermiques et des risques d'ensablement.

La méthodologie adoptée comprend l'étude du tracé géométrique en plan et en profil en long, le calcul des sollicitations mécaniques sous l'effet des charges par essieu lourdes caractéristiques des trains de fret, ainsi que la caractérisation des éco-matériaux locaux pour les couches d'assise. Les résultats valident le choix structurel des composants (rails à long rail soudé LRS, traverses en béton précontraint) et optimisent l'épaisseur des couches de forme pour garantir la stabilité à long terme de la voie face aux phénomènes de déformation. Ce travail dresse ainsi une feuille de route technique pour la réalisation durable de cette ligne ferroviaire d'intérêt national.

Mots-clés : Ligne ferroviaire, Avant-Projet Détaillé (APD), Gara Djebilet, Dimensionnement de voie, Ballast, Géotechnique saharienne, ANESRIF.

ABSTRACT

This Master's thesis delivers a comprehensive Detailed Avant-Projet Study (APD) of the PK 740+000 to PK 750+000 section of the new strategic railway line connecting Béchar to Gara Djebilet (Tindouf). The primary objective of this mining and transport infrastructure is to open up the region and facilitate the large-scale hauling of iron ore. Focused on Materials and Civil Engineering infrastructure, this work details the rigorous structural design of the track superstructure (rails, sleepers, ballast) and substructure layers, alongside the geotechnical evaluation of earthworks in a harsh desert environment. The design framework integrates international technical specifications (such as UIC 719 R and 720 R leaflets, EN 13674, and EN 13230 standards) tailored to the extreme climatic and geomorphological constraints of the Algerian Sahara, notably severe temperature fluctuations and sand encroachment risks.

The adopted methodology encompasses the geometric structural design (horizontal alignment and vertical profile), the mechanical stress analysis under heavy axle loads typical of heavy-haul freight trains, and the characterization of local eco-materials for the subgrade layers. The findings validate the structural selection of track components (Continuously Welded Rails - CWR, prestressed concrete sleepers) and optimize the thickness of the sub-ballast and capping layers to prevent deformation and ensure long-term track stability. Ultimately, this study provides a robust technical framework for the sustainable construction of this crucial national railway corridor.

Keywords: Railway line, Detailed Avant-Projet (APD), Gara Djebilet, Track design, Ballast, Saharan geotechnics, ANESRIF.

الملخص

يقدم مشروع نهاية الدراسة هذا دراسة مشروع تمهيدي تفصيلي (APD) للشطر الممتد من النقطة الكيلومترية PK 740+000 إلى PK 750+000 من خط السكة الحديدية الاستراتيجية الجديد الذي يربط بين بشار وغارا جبيلات (تندوف). يكمن الهدف الرئيسي من هذه البنية التحتية المنجمية في فك العزلة عن المنطقة وضمان نقل خام الحديد على نطاق واسع. وتندرج هذه الدراسة ضمن تخصص "المواد"، حيث تركز على التصميم الهيكلي الدقيق لمكونات السكة (القضبان، العوارض، الحصى) والتقييم الجيوتقني للمنصات في البيئة الصحراوية. تدمج الدراسة المواصفات الفنية الدولية) بطاقات UIC 719 R و R720 ، والمعايير EN 13674 و EN 13230 وتكيفها مع الظروف المناخية والجيومورفولوجية القاسية للجنوب الجزائري، والتي تتميز بالفوارق الحرارية العالية ومخاطر زحف الرمال.

تتضمن المنهجية المتبعة دراسة المسار الهندسي الخطى والملف الطولي، وحساب الإجهادات الميكانيكية الناتجة عن حمولات المحاور الثقيلة المميزة لقطارات شحن البضائع، بالإضافة إلى تحديد خصائص المواد المحلية لطبقات التأسيس. وقد أكدت النتائج صحة الاختيار الهيكلي للمكونات) قضبان ملحومة للمسافات الطويلة LRS ، عوارض من الخرسانة سابقة الإجهاد (وسمحت بتحسين سمك طبقات الشكل لضمان استقرار السكة على المدى الطويل ومقاومة التشوهات. وفي الختام، يضع هذا العمل خارطة طريق تقنية لتجسيد هذا الخط الحديدي ذو الأهمية الوطنية بطريقة مستدامة.

الكلمات المفتاحية: خط السكة الحديدية، مشروع تمهيدي تفصيلي (APD)، غارا جبيلات، تصميم السكة، الحصى (Ballast)، الجيوتقنية الصحراوية، بطاقات UIC، الوكالة الوطنية للدراسات ومتابعة إنجاز الاستثمارات في السكك الحديدية (ANESRIF)

SOMMAIRE

DÉDICACE	P2
REMERCIEMENTS	P3
RÉSUMÉ	P4
LISTE DE VONTENU	P7
Liste des tableaux	P13
Liste des figures	P17
INRODUCTION	P22
LISTE DES ABREVIATIONS	P21
Chapitre 1 : Description du Projet et Données de Base	P25
1. Introduction	P26
2. Description du projet.....	P26
2.1. Études géographiques - Emplacement du projet.....	P26
2.2. Longueur de la ligne.....	P28
2.3. Type de ligne	P28
2.4. Vitesse de référence.....	P28
2.5. Écartement de la voie.....	P29
2.6. Normes et règlements utilisés :	P29
3. Données de base.....	P30
3.1. Données topographiques.....	P30
3.2. Données géotechniques.....	P31
3.3. Données hydrologiques.....	P32
3.4. Données climatiques.....	P33
3.5. Données de trafic.....	P33
4. Conclusion	P34
Chapitre 2 : Étude de Trafic et de Capacité	P36
1. Introduction	P37
2. Analyse de la demande.....	P37
2.1. Méthodologie d'analyse	P37

2.2. Zone d'influence de la ligne.....	P37
3. Prévisions du trafic voyageurs et marchandises.....	P38
3.1. Trafic de marchandises.....	P38
3.2. Trafic voyageurs.....	P38
4. Choix de la vitesse Justifications techniques et économiques.....	P39
4.1 Critères de choix de la vitesse.....	P39
4.2. Analyse comparative des scénarios de vitesse.....	P39
4.3. Impact de la vitesse sur les paramètres de voie.....	P39
5. Capacité de la ligne : Espacement des trains et débit journalier.....	P40
5.1. Définition de la capacité	P40
5.2 Calcul de l'intervalle minimal entre trains.....	P40
5.3. Capacité théorique et pratique de la ligne.....	P40
6. Temps de parcours.....	P41
6.1. Méthodologie de calcul.....	P41
6.2. Gares et points d'arrêt prévus.....	P41
6.3. Estimation des temps de parcours.....	P42
7. Conclusion	P43
CHAPITRE 3 : ÉTUDE DU TRACÉ FERROVIAIRE.....	P44
1. Introduction	P45
2. Tracé en Plan.....	P45
2.1. Situation géographique du projet.....	P45
2.2. Système de coordonnées.....	P46
2.3 Réalisation des levés topographiques.....	P46
2.3 Réalisation des levés topographiques.....	P46
2.3.1 Polygone principale et vérifications.....	P46
2.3.2 Polygone secondaire intermédiaire.....	P46
2.4 Listing des stations et facteur d'échelle.....	P46
2.5 DONNE GEODESIQUES.....	P47
2.6 FICHES SIGNALÉTIQUES DES STATIONS EXTRAITS.....	P48
2.6.1 Station P20 — Début du sous-tronçon (PK ~740+084)	P49
2.6.2 Station P43 — Milieu du sous-tronçon (PK ~745+443)	P49

2.6.3 Station P50 — Fin du sous-tronçon (PK ~747+261)	P50
2.7 CONTRAINTES RENCONTRÉES SUR LE SOUS-TRONÇON.....	P50
2.7.1 Présence de fibres optiques.....	P50
2.7.2 Lignes électriques moyenne tension.....	P50
2.8 PROFIL ALTIMÉTRIQUE — SOUS-TRONÇON PK 740+000 / PK 750+000	P50
2.9. TRACÉ EN PLAN — DESCRIPTION DU SOUS-TRONÇON	P51
2.9.1 Description planimétrique détaillée	P51
2.9.2 Longueur Minimale des Éléments de Tracé.....	P52
2.9.3 Rayon Minimal des Courbes Circulaires	P52
2.9.4 Vitesse Admissible en Courbe	P54
2.9.5 Alignements Droits — Caractéristiques Détaillées	P54
2.9.6 Courbe Circulaire ARC3 — Caractéristiques Complètes	P54
2.9.7 Courbes de Transition — Clothoïdes CLO2 et CLO4	P55
2.9.8 Dévers : Longueur, Insuffisance et Excès	P56
3. Profil en Long	P58
3.1 Pente Maximale Admissible	P59
3.2 Raccordements Verticaux (Courbes Paraboliques)	P60
3.3 Calcul des Pentes Longitudinales.....	P61
3.4. Longueur Minimale des Tronçons à Déclivité Constante :	P62
3.5. Confort Dynamique Vertical.....	P63
3.6 Distance de Visibilité	P63
4. Profil en Travers	P63
4.1. Largeur de la Plate-forme	P64
4.2 Talus et Fossés.....	P65
4.3. Assainissement	P66
4.4. Stabilité des Talus	P66
4.5. Volumes de Déblais et Remblais	P68
4.6. Synthèse du Profil en Travers.....	P70
5. Conclusions	P70
Chapitre 4 : Superstructure de la Voie.....	P72
1. introduction	P73

2. SITUATION DONNÉES TOPOGRAPHIQUES Et GÉOLOGIQUES DU SITE	P73
2.1 Contexte géologique de la région de Tindouf.....	P73
2.2 Stratigraphie et lithologie.....	P73
2.3 Contexte topographique du tronçon.....	P74
3. PROGRAMME DE RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE DU TRACÉ.....	P74
3.1 Puits de reconnaissance — Localisation.....	P74
4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES ESSAIS.....	P75
4.1 Résultats des essais de laboratoire Plateforme	P75
4.2 Commentaires et interprétation des résultats.....	P75
5. ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES ET CLASSIFICATION DES SOLS.....	P77
6. GÎTES À MATÉRIAUX ET CARRIÈRES POUR GRANULATS.....	P78
6.1 Gîtes à matériaux — Gîte du PK 748+200.....	P78
6.2 Carrière pour granulats — Sud Express T.P à Oued Oum El Assel.....	P79
7. CLASSIFICATION DES SOLS ET DES PLATEFORMES.....	P81
7.1 Classification des sols pour la plateforme (fiche UIC 719)	P81
7.2 Classification des plateformes (P1, P2, P3)	P82
8. CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DE L'ASSISE — FICHE UIC 719-R.....	P82
8.1 Plateforme proposée	P82
8.2 Méthode de dimensionnement — Formule UIC 719.....	P82
8.3 Répartition des couches d'assise.....	P82
9. SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES MATÉRIAUX DE LA PLATEFORME	P83
9.1 Ballast.....	P83
9.2 Couche de sous-ballast.....	P84
9.3 Couche de fondation.....	P84
9.4 Couche de forme de qualité QS3.....	P84
9.5 Remblai courant — Spécifications.....	P84
10. ZONES À RISQUES GÉOTECHNIQUES.....	P85
11. TERRASSEMENTS — MOUVEMENT DES TERRES ET MÉTHODES D'EXÉCUTION.....	P85

11.1 Analyse du mouvement des terres.....	P85
11.2 Prescriptions pour l'exécution des terrassements.....	P85
12. COMPACTAGE DE LA PLATEFORME FERROVIAIRE.....	P86
12.1 Principes généraux du compactage en infrastructure ferroviaire.....	P86
12.2 Matériels de compactage utilisés.....	P86
12.2.1 Compacteur à cylindres lisses vibrants tandem (CV)	P86
12.2.2 Compacteur monocylindre vibrant (CM)	P87
12.2.3 Compacteur pneumatique (CP)	P87
12.3 Formules de calcul du nombre de passes.....	P88
12.4 Nombre de passes recommandé par couche.....	P88
12.5 Conditions de mise en œuvre et contrôle.....	P89
12.6 Récapitulatif du scénario de compactage retenu.....	P89
13. CONCLUSION.....	P90
Chapitre 5 : Ouvrages d'Art et Contraintes Spécifiques du Milieu Saharien.....	P91
1. INTRODUCTION	P92
2. CHOIX DU TYPE DE VOIE.....	P92
3. COMPOSANTS D'UNE VOIE FERRÉE BALLASTÉE	P93
3.1 Trois profils UIC sont utilisés sur les réseaux ferroviaires.....	P93
3.2 Caractéristiques du Rail UIC 60.....	P95
3.3 Types de Traverses – Traverse Bi-Bloc Retenue.....	P96
4. COUCHE D'ASSISE : BALLAST ET SOUS-BALLAST.....	P99
4.1 Ballast – Granite 25/50 mm.....	P99
4.2 Sous-ballast – Couche de protection et de répartition.....	P100
5. ATTACHES, ÉCLISSAGE ET FIXATIONS.....	P101
5.1 Système d'Attache Pandrol SKL14.....	P103
5.2 Éclissage des Joints de Rail.....	P103
6. Stockage des Rails et des Traverses sur Chantier.....	P103
6.1 Stockage des Rails.....	P103
6.2 Stockage des Traverses Bi-Bloc.....	P104
7. ESSAIS DE CONTRÔLE QUALITÉ – RAILS ET TRAVERSES.....	P105
7.1 Essais sur les Rails.....	P105

7.2 Essais de Pesée (Balance)	P106
7.3 Essais sur les Traverses.....	P107
8. Soudage des Rails – Technique LRS.....	P107
8.1 Soudure Aluminothermique (in situ)	P109
8.2 Soudure par Étincelage (Flash-Butt Welding)	P111
9. BORNAGE DES TRAVERSES.....	P112
9.1 Procédure de Bornage.....	P112
9.2 Tolérances de Bornage.....	P112
10. ASSEMBLAGE, ÉQUILIBRAGE ET MISE EN SERVICE DE LA VOIE	P112
10.1 Séquence d'Assemblage de la Voie.....	P114
10.2 Opération d'Équilibrage (LRS – Mise à la T° Neutre)	P115
11. RÉCAPITULATIF DE LA SUPERSTRUCTURE RETENUE.....	P115
12. Conclusion.....	P116
Conclusion Générale et Perspectives.....	P118
Références.....	P

Liste des Tableaux

Tableaux 1 : la décomposition de la ligne par tronçons.....	P28
Tableaux 2 : Synthèse des caractéristiques techniques de la ligne.....	P28
Tableaux 3 : Vitesses de référence et vitesses commerciales par type de train.....	P29
Tableaux 4 : Paramètres géométriques fondamentaux de la voie	P29
Tableaux 5 : Données topographiques et caractéristiques géométriques du tracé.....	P29
Tableaux 6 : Typologie des sols sahariens et préconisations de traitement...	P32
Tableaux 7 : Synthèse hydrologique et ouvrages de franchissement hydraulique.....	P33
Tableaux 8 : Paramètres climatiques extrêmes et leurs impacts sur les infrastructures.....	P33
Tableaux 9 : Projections de trafic et évolution de la capacité d'exploitation (2030–2050)	P34
Tableaux 10 : Données démographiques des wilayas desservies et structure des gares.....	P37
Tableaux 11 : Planning de montée en charge de la production minière et cadencement des trains	P38
Tableaux 12: Évolution des prévisions de trafic voyageurs et cadencement du service.....	P38
Tableaux 13 : Analyse comparative des scénarios de tracé et justification du choix technique.....	P39
Tableaux 14 : Influence de la vitesse de référence sur les paramètres géométriques de la voie.....	P39
Tableaux 15 : Synthèse de la capacité de circulation et limites de l'exploitation ferroviaire.....	P40

Tableaux 16 : Schéma d'exploitation : liste des gares, pointage kilométrique et temps d'arrêt.....	P41
Tableaux 17 : Synthèse des temps de parcours et performances opérationnelles par type de train.....	P42
Tableau 18 — Équipements topographiques déployés sur le Tronçon N°04.....	P46
Tableau 19 Stations de la polygonale secondaire — PK 740+000 / PK 750+000 (Système UTM 29 N / WGS 84)	P48
Tableau 20 Profil altimétrique par tranche kilométrique — PK 740+000 / PK 750+000.....	P51
Tableau 21 Caractéristiques générales du tracé — PK 740+000 / PK 750+000.....	P51
Tableau 22 Vérification des longueurs minimales des éléments de tracé.....	P52
Tableau 23 Récapitulatif des rayons minimaux admissibles (V=160/70 km/h)	P53
Tableau 24 Vitesse admissible en courbe ARC3 selon le critère.....	P54
Tableau 25 Caractéristiques géométriques des alignements droits.....	P54
Tableau 26 Fiche complète de la courbe circulaire ARC3.....	P55
Tableau 27 Caractéristiques des clothoïdes CLO2 et CLO4.....	P56
Tableau 28 Dévers maximal admissible.....	P57
Tableau 29 – Synthèse complète des paramètres de dévers pour ARC3.....	P58
Tableau 30 Déclivités maximales admissibles en pleine voie.....	P60
Tableau 31 Déclivités du profil en long PK 740+000 – PK 750+000.....	P60
Tableau 32 Listing complet des raccordements verticaux (source DEX SETO).....	P61
Tableau 33 Listing d'implantation axe voie PK 740+000 – PK 741+000 (extrait).....	P62
Tableau 34 Longueurs minimales des tronçons à pente constante.....	P62
Tableau 35 Vérification des longueurs des tronçons à déclivité constante...	P62
Tableau 36 Accélérations verticales aux raccordements.....	P63
Tableau 37 Composition transversale de la plate-forme.....	P65
Tableau 38 Caractéristiques des couches constitutives de l'assise (Spec. ST590B)	P65
Tableau 39 Pentes des talus : comparaison APD courants vs. Profil en travers type.....	P65
Tableau 40 Paramètres géotechniques moyens des sols du sous-tronçon.....	P67
Tableau 41 Bilan volumétrique global des terrassements.....	P68
Tableau 42 Listing des volumes de remblai cumulés (source : DEX SETO).....	P69

Tableau 43 Extrait listing volume de décapage (source : DEX SETO)	P69
Tableau 44 Volumes de matériaux de l'assise (extrait PK 740+200 – 740+300).....	P70
Tableau 45 Récapitulatif général du profil en travers PK 740+000 – 750+000.....	P70
Tableau 46 Programme des essais géotechniques.....	P74
Tableau 47 Synthèse des caractéristiques lithologiques et profondeur des puits de reconnaissance.....	P75
Tableau 48 Synthèse des résultats des essais de laboratoire (Identification physique et mécaniques)	P75
Tableau 49 Synthèse de la portance CBR et classification UIC des sols de plateforme.....	P76
Tableau 50 Synthèse des essais de laboratoire : Granulométrie et nature des sols.....	P78
Tableau 51 Descriptif lithologique de la reconnaissance au PK 748+200.....	P79
Tableau 52 Résultats des essais de laboratoire – Gîte du PK 748+200.....	P79
Tableau 53 Fiche de qualification des granulats : Carrière d'Oued Oum El Assel.....	P80
Tableau 54 Classification géotechnique des sols de plateforme ferroviaire (Référentiel UIC 719)	P81
Tableau 55 Synthèse des exigences de portance et classification des plateformes ferroviaires.....	P81
Tableau 56 Justification technique des épaisseurs de la structure de voie.....	P82
Tableau 57 Composition et épaisseurs des couches d'assise de la voie (Structure P3)	P82
Tableau 58 Spécifications techniques et exigences de qualité du ballast ferroviaire.....	P83
Tableau 59 Fiche technique des exigences pour la réalisation des remblais ferroviaires.....	P84
Tableau 60 synthèse de l'évaluation des risques géotechniques (PK 736 – PK 750)	P85
Tableau 61 Application numérique des formules GTR pour le sous-tronçon PK 740+000–750+000 ($\alpha = 0,65$)	P88
Tableau 62 Nombre de passes recommandé par engin et par type de couche (GTR, SETRA 1992 — adapté au ferroviaire)	P89
Tableau 63 Analyse comparative – Voie Ballastée vs Voie sur Dalle – Projet Gara Djebilet.....	P92
Tableau 64 Comparaison des profils de rail UIC.....	P95
Tableau 65 Caractéristiques mécaniques du Rail UIC 60 – EN 13674-1.....	P96
Tableau 66 Comparaison des types de traverses – Choix pour Gara Djebilet.....	P98
Tableau 67 Caractéristiques de la traverse bi-bloc béton précontraint B60.....	P98

Tableau 68 Spécifications du ballast granite 25/50 mm – EN 13450 Classe F1.....	P100
Tableau 69 Règles de stockage des rails UIC 60 sur chantier ferroviaire.....	P103
Tableau 70 Règles de stockage des traverses bi-bloc béton précontraint.....	P105
Tableau 71 Programme d'essais de réception des rails UIC 60 –.....	P106
Tableau 72 Programme d'essais de réception des traverses bi-bloc	P107
Tableau 73 Comparaison des procédés de soudage des rails.....	P111
Tableau 74 Tolérances de bornage des traverses – Réception de voie.....	P112
Tableau 75 Séquence des opérations de pose et d'assemblage – Ligne Béchar– Gara Djebilet.....	P114
Tableau 76 Paramètres d'équilibrage LRS – Chantier Gara Djebilet.....	P115
Tableau 77 Fiche technique complète de la superstructure – Ligne Béchar–Gara Djebilet.....	P116

Liste des figures

Figure 1 : Carte du réseau ferroviaire algérien — Le projet Béchar-Tindouf (ligne rouge Ouest)	P27
Figure 2 : Tracé du projet — De Béchar (nord) vers Gara Djebilet (Tindouf, sud)	P27
Figure 3 Matériel de levé topographique : station totale Leica TS06+.....	P30
Figure 4 GPS professionnel	P31
Figure 5 : Travaux de carottage.....	P32
Figure 6 : Train minéralier en zone désertique — illustration du trafic fret.....	P34
Figure 7: train de ghara djebilet.....	P41
Figure 8 : section type de la gare	P42
Figure 9 : Infrastructure ferroviaire sur viaduc — Qualité de l'ouvrage terminé.....	P42
Figure 10 : Réseau ferroviaire algérien (gauche) Programme ANESRIF (droite).....	P43
Figure 11 situation de projet	P47
Figure 12 Fiche signalétique de la borne P20 (AXE) — PK ~740+084 — X : 591 378.099, Y : 3 069 788.675, Z : 432.693 m.....	P49
Figure 13 — Fiche signalétique de la borne P43 (AXE) — PK ~745+443 — X: 595 858.764, Y: 3 074 090.326, Z: 428.832 m.....	P49
Figure 14 Fiche signalétique de la borne P50 (AXE) — PK ~747+261 — X: 596 123.525, Y: 3 075 967.427, Z: 425.572 m.....	P50
Figure 15 Schéma du profil en long PK 740+000 – PK 750+000.....	P59
Figure 16 Profil en travers type — Remblai courant ($H > 8$ m)	P64
Figure 17 Profil en travers type 3D (Remblai $H \leq 8$ m) Ligne Béchar -gara Djebilet-plateforme 8.00m	P67

Figure 18 essai de plaque et sondage carotté.....	P74
Figure 19 Illustration du dispositif et de la courbe représentative de l'Essai Proctor Modifié.....	P76
Figure 20 Dispositif de l'essai CBR (California Bearing Ratio) pour la détermination de la portance des sols.....	P76
Figure 21 valeur CBR a100% OPM sous tronçon PK 740+000 – PK 750+000.....	P77
Figure 22 Synthèse des analyses granulométriques (Tronçon PK 740+000 – 750+000)	P78
Figure 23 Vue des travaux de terrassement et d'extraction au niveau du gîte principal situé au PK 748+200.	P79
Figure 24 Situation géographique et tracé du projet ferroviaire (PK 735+000 – PK 808+900)	P80
Figure 25 coupe transversale de la plateforme ferroviaire (type p3)	P83
Figure 26 COUPE TYPE DE LA PLATEFORME FERROVIAIRE — PK 736+000 AU PK 750+000.....	P83
Figure 27 schéma d'une voie de LGV (Alias &Gentil, 1984).....	P84
Figure 28 Compacteur à Cylindres Lisses Vibrants Tandem (CV) — Type DYNAPAC CA 250D / BOMAG BW 213DH.....	P86
Figure 29 Compacteur Monocylindre Vibrant (CM) — Type BOMAG BW 226DH-4 / DYNAPAC CA 302D.....	P87
Figure 30 Compacteur Pneumatique (CP) — Type DYNAPAC CP 274 / CATERPILLAR PS 300B.....	P88
Figure 31 Vue des travaux de terrassement et de la plateforme en cours de préparation (Tronçon Tindouf)	P92
Figure 32 Schéma fonctionnel des composants d'une voie ferrée ballastée....	P93
Figure 33 Caractéristiques géométriques et mécaniques des différents profils de rails selon la norme EN 13674-1.....	P94
Figure 34 Comparaison des profils de rail : UIC 46 / UIC 54 / UIC 60 Retenu – Sections et caractéristiques.....	P94

Figure 35 Vue de profil et stockage des rails de type UIC 60 avant mise en œuvre.	P95
Figure 36 Interface roue-rail : détail des composants de la roue et zones de contact.....	P95
Figure 37 Rail UIC 60 : Section transversale (gauche), pose LRS avec soudures (centre), caractéristiques (droite)	P96
Figure 38 Pose mécanisée de traverses en béton bi-bloc à l'aide d'un portique de manutention.....	P97
Figure 39 STOCKAGE INDUSTRIEL DE TRAVERSES EN BÉTON BI-BLOC SUR LE SITE DE PRÉFABRICATION.....	P97
Figure 40 VUE EN PERSPECTIVE D'UNE VOIE FERRÉE EN COURBE ÉQUIPÉE DE TRAVERSES EN BÉTON.....	P97
Figure 41 DIMENSIONS GÉOMÉTRIQUES D'UNE TRAVERSE EN BÉTON MONOBLOC.....	P97
Figure 42 Traverse bi-bloc béton précontraint : Vue 3D détaillée – L=2 600mm, fils Ø7mm, attaches Pandrol.....	P98
Figure 43 BALLAST EN GRANITE DE GRANULOMÉTRIE 25/50 MM UTILISÉ POUR LA VOIE FERRÉE.....	P99
Figure 44 SUPERSTRUCTURE AVEC MISE EN PLACE DU BALLAST AUTOUR DES TRAVERSES.....	P100
Figure 45 COUPE TRANSVERSALE DE LA SUPERSTRUCTURE FERROVIAIRE MONTRANT LA STRATIFICATION DES COUCHES DE BALLAST, DE SOUS-BALLAST ET DE PLATEFORME.....	P101
Figure 46 DÉTAIL DES COMPOSANTS DE L'INTERFACE RAIL-TRAVERSE ET DU SYSTÈME DE FIXATION ÉLASTIQUE.....	P101
Figure 47 Vue éclatée des composants de fixation d'un rail sur une traverse en béton.....	P102
Figure 48 Boulon d'attache et ensemble de fixation mécanique pour rail.....	P102
Figure 49 BOULONS D'ASSEMBLAGE POUR ASSEMBLAGE D'ÉCLISSES DE RAIL.....	P102

Figure 50 INSPECTION TECHNIQUE ET CONTRÔLE QUALITÉ DES RAILS UIC 60 SUR LE PARC DE STOCKAGE.....	P104
Figure 51 BOULONS D'ASSEMBLAGE (TYPE HAUTE RÉSISTANCE) UTILISÉS POUR LA FIXATION MÉCANIQUE DES COMPOSANTS DE LA VOIE.....	P104
Figure 52 Transport et livraison ferroviaire de traverses en béton bi-bloc sur le site du projet.....	P105
Figure 53 STATION DE CONTRÔLE ET ESSAI DE PESÉE INDUSTRIELLE POUR TRAVERSE EN BÉTON.....	P107
Figure 54 Parc de stockage industriel de traverses en béton précontraint sur site de préfabrication.....	P107
Figure 55 OPÉRATION DE SOUDURE ALUMINOTHERMIQUE RÉALISÉE IN SITU SUR VOIE.....	P108
Figure 56 CONTRÔLE DIMENSIONNEL DE L'ÉCARTEMENT ET ALIGNEMENT DES RAILS POUR LA SOUDURE.....	P108
Figure 57 Contraintes thermiques et force longitudinale.....	P109
Figure 58 DISPOSITIF DE SOUDURE ALUMINOTHERMIQUE (PROCÉDÉ THERMIT®) EN COURS D'OPÉRATION SUR LE CHANTIER DE VOIE.....	P110
Figure 59 JOINT DE SOUDURE PAR ÉTINCELAGE (FLASH-BUTT WELDING) EN PHASE DE REFROIDISSEMENT INITIAL SUR VOIE.....	P111
Figure 60 CHANTIER D'ASSEMBLAGE FINAL DE LA VOIE FERRÉE (POSE DES TRAVERSES ET RAILS EN PRÉSENCE DE L'ÉQUIPE DE SUPERVISION ET D'UN ENGIN DE TERRASSEMENT)	P113
Figure 61 SCHÉMA TECHNIQUE DÉTAILLÉ DE L'ASSEMBLAGE D'UNE TRAVERSE BI-BLOC AVEC ENTRETOISE ET BARRE DE LIAISON.....	P113
Figure 62 TABLEAU DE BORD DU CHANTIER FERROVIAIRE – TRAVAUX DE POSE DE VOIE – LIGNE BÉCHAR-GARA DJEBILET.....	P114

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abbréviatio n	Signification
ANESRIF	Agence Nationale d'Études et de Suivi de la Réalisation des Investissements Ferroviaires
SNTF	Société Nationale des Transports Ferroviaires
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer
VOA	Voie et Ouvrages d'Art
LRS	Longs Rails Soudés
PK	Point Kilométrique
UIC 60	Rail de type UIC pesant 60 kg par mètre linéaire
BHP	Béton Haute Performance
GCVM	Gabarit de Chargement de Voie Métrique
MJA	Mouvement Journalier Annuel
UTO	Unité de Transport Offerte
TPH	Trains Par Heure
CV	Capacité Voyageurs
GHz	Gara Djebilet (abréviation utilisée en interne)

Introduction

Introduction Générale

L'Algérie dispose de l'une des plus grandes réserves mondiales de minerai de fer, concentrées dans le gisement de Gara Djebilet, situé à proximité de Tindouf, à l'extrême sud-ouest du pays. Ces réserves, estimées à plus de 3,5 milliards de tonnes de minerai à haute teneur en fer, constituent une richesse naturelle considérable dont la valorisation est devenue une priorité nationale dans le cadre de la diversification de l'économie algérienne.

Cependant, l'éloignement géographique de ce gisement des zones industrielles et des ports d'exportation constitue le principal obstacle à son exploitation à grande échelle. En effet, Gara Djebilet se trouve à environ 1 700 km d'Oran et à près de 2 000 km du complexe sidérurgique d'El-Hadjer à Annaba. Dans ce contexte, le transport routier ou par convoi est totalement inadapté pour assurer l'acheminement de volumes massifs de minerai de façon économique et durable.

La solution retenue par les autorités algériennes est la construction d'une ligne ferroviaire reliant Béchar à Tindouf (Gara Djebilet), d'une longueur d'environ 950 km. Ce projet, confié à l'ANESRIF, représente non seulement un défi technique et logistique majeur, mais aussi une opportunité stratégique pour le développement économique du Grand Sud algérien.

Le présent mémoire s'inscrit dans ce contexte et se propose d'étudier les aspects techniques fondamentaux de ce projet ferroviaire, dans le cadre de la filière Voie et Ouvrages d'Art (VOA). L'étude est structurée autour de cinq chapitres principaux.

Le projet de la ligne ferroviaire Béchar — Gara Djebilet s'inscrit dans le Programme National de Développement des Infrastructures Ferroviaires (PNDIF), lancé par le gouvernement algérien dans le cadre des plans quinquennaux successifs depuis 2005. Il s'agit de l'un des projets ferroviaires les plus ambitieux jamais entrepris en Algérie et en Afrique du Nord.

Ce projet revêt une importance stratégique à plusieurs niveaux : économique (valorisation du gisement de Gara Djebilet, création d'emplois), social (désenclavement de la région de Tindouf), géopolitique (renforcement de la souveraineté nationale dans les zones frontalières) et continental (intégration dans le projet de la Trans-saharienne ferroviaire reliant l'Algérie aux pays subsahariens)

Les principaux objectifs de ce travail de recherche peuvent se résumer comme suit :

- Présenter de manière exhaustive le projet de la ligne ferroviaire Béchar — Gara Djebilet.

- Collecter et analyser toutes les données de base nécessaires à l'étude technique (topographiques, géotechniques, hydrologiques, climatiques et de trafic).
- Réaliser une étude de trafic complète permettant de dimensionner la ligne en termes de capacité et de débit.
- Justifier les choix techniques retenus (vitesse de référence, type de voie, écartement) sur la base d'arguments techniques et économiques.
- Estimer les temps de parcours et la capacité journalière de la ligne.

La méthodologie de travail adoptée pour la réalisation de ce mémoire repose sur une démarche rigoureuse en plusieurs étapes. Dans un premier temps, une recherche bibliographique approfondie a été menée pour collecter les données relatives au projet et aux normes ferroviaires applicables. Dans un second temps, les données collectées ont été analysées et interprétées pour servir de base aux calculs techniques.

Les études ont été réalisées conformément aux normes et règlements en vigueur, notamment les normes UIC (Union Internationale des Chemins de Fer), les règlements de l'ANESRIF et les standards algériens relatifs aux infrastructures ferroviaires.

Organisation et structure du mémoire

Le présent mémoire est organisé en deux chapitres principaux, précédés d'une introduction générale et suivis d'une conclusion générale et de perspectives :

- Le Chapitre 1 est consacré à la description complète du projet et à la présentation des données de base utilisées dans les études.
- Le Chapitre 2 présente l'étude de trafic et de capacité de la ligne, avec l'analyse de la demande, les prévisions de trafic, le choix de la vitesse et le calcul de la capacité.
- Le chapitre 3 détaille l'étude du tracé ferroviaire du tronçon PK 740+000 – PK 750+000, abordant la conception géométrique en plan (alignements, courbes, clothoïdes, dévers), le profil en long (pentes, raccordements verticaux, confort dynamique) et le profil en travers (plateforme, assainissement, cubatures de terrassement).
- Le chapitre 4 développe l'étude géotechnique et les terrassements, comprenant la reconnaissance des sols, l'évaluation de leur niveau de portance, ainsi que les méthodes d'exécution des mouvements de terre, des déblais et des remblais pour le dimensionnement de la plateforme.
- Le Chapitre 5 traite de l'étude de la structure de la voie, en comparant les options de voie ballastée et sur dalle, et en définissant les composants techniques retenus (rails, traverses, ballast et sous-ballast) ainsi que les protocoles de mise en œuvre et de contrôle thermique nécessaires à la pérennité de l'infrastructure.
- Conclusion.

Chapitre 1

Description du

Projet et Données de

Base

Chapitre 1 : Description du Projet et Données de Base

1. Introduction :

Ce premier chapitre présente de manière exhaustive le projet de la ligne ferroviaire Béchar — Gara Djebilet (Tindouf) et expose l'ensemble des données de base nécessaires à la réalisation de l'étude technique.

La première partie de ce chapitre définit les caractéristiques techniques de cette ligne à trafic mixte (de type LPFV), destinée à accueillir à la fois des trains de marchandises pour le minerai de fer et des trains de voyageurs. Nous y présentons les choix retenus concernant la longueur de la ligne, la vitesse de référence, l'écartement de la voie normale, ainsi que le corpus des normes et règlements utilisés, notamment les normes UIC et les règlements de l'ANESRIF.

La seconde partie rassemble et analyse toutes les données de base utilisées dans le cadre de la filière Voie et Ouvrages d'Art (VOA). Nous présentons successivement les données topographiques, les données géotechniques, les données hydrologiques relatives aux oueds, les données climatiques du contexte saharien, et enfin les données et prévisions de trafic à l'horizon 2030, 2040 et 2050.

2. Description du projet

2.1. Études géographiques - Emplacement du projet

La ligne ferroviaire Béchar — Gara Djebilet relie deux points géographiques situés dans le Grand Sud-Ouest algérien. Le point de départ est la ville de Béchar, chef-lieu de la wilaya éponyme, localisée à 32°29' N et 2°13' O, à une altitude d'environ 770 m. Le point d'arrivée est la zone de Gara Djebilet, dans la wilaya de Tindouf, localisée à 27°40' N et 8°10' O, à une altitude d'environ 450 m.

Le tracé de la ligne traverse plusieurs zones géomorphologiques distinctes : la dépression de la Saoura au nord, les hauts plateaux du Tademaït, les ergs de l'Erg Occidental et les hamadas du Draa et du Guir. Cette diversité du terrain impose des contraintes techniques spécifiques à chaque tronçon de la ligne.

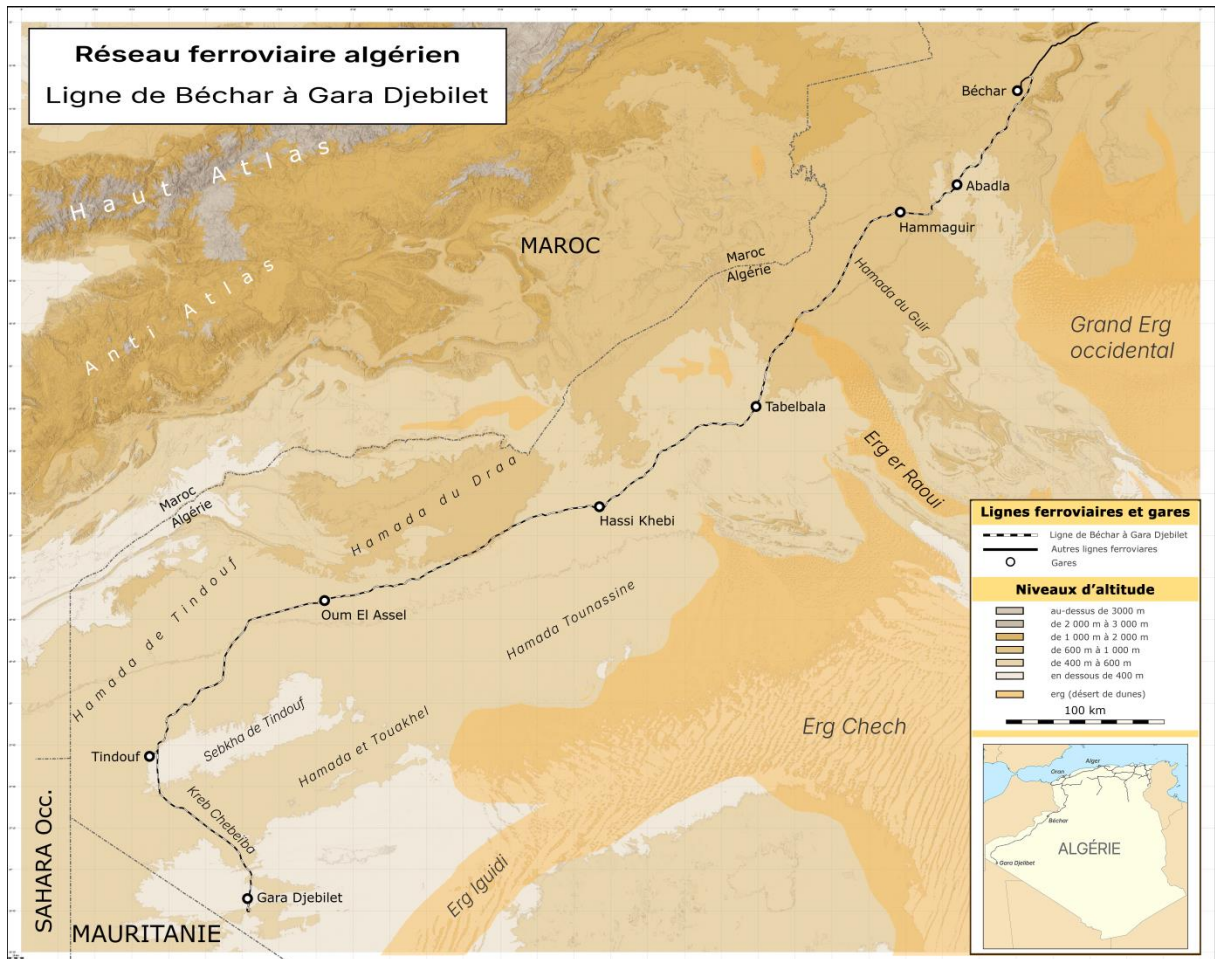


Figure 1 : Carte du réseau ferroviaire algérien — Le projet Béchar-Tindouf (ligne rouge Ouest)

Le tracé a été défini après plusieurs études de faisabilité, en cherchant à minimiser les coûts de construction notamment par la limitation des courbes à faible rayon, des remblais importants et des ouvrages d'art coûteux, tout en respectant les contraintes géotechniques et environnementales du terrain.



Figure 2 : Tracé du projet — De Béchar (nord) vers Gara Djebilet (Tindouf, sud)

2.2. Longueur de la ligne

La ligne ferroviaire Béchar - Gara Djebilet présente une longueur totale d'environ 950 km, répartis en plusieurs tronçons distincts correspondant à des phases de réalisation successives. Le tableau suivant présente la décomposition de la ligne par tronçons :

Tableaux 1 : la décomposition de la ligne par tronçons

Tronçon	De	À	Longueur (km)	Phase
Tronçon 1	Béchar	Abadla	90 km	Phase 1 — Prioritaire
Tronçon 2	Abadla	Beni Ounif	180 km	Phase 1 — Prioritaire
Tronçon 3	Beni Ounif	Aïn Ben Khelil	250 km	Phase 2
Tronçon 4	Aïn Ben Khelil	Oum El Assel	230 km	Phase 2
Tronçon 5	Oum El Assel	Gara Djebilet	200 km	Phase 3
TOTAL	—	—	~950 km	—

2.3. Type de ligne :

La ligne Béchar — Gara Djebilet est conçue comme une ligne à trafic mixte de type « Ligne Principale de Fret et de Voyageurs » (LPFV). Cette classification correspond aux lignes destinées à accueillir à la fois des trains de marchandises lourds principalement du minerai de fer et des trains de voyageurs assurant les liaisons régionales.

Ce choix de ligne mixte est justifié par la double vocation du projet : l'exportation du minerai de Gara Djebilet vers les ports du nord, et la desserte en transport de voyageurs de la région de Tindouf et des localités traversées. La conception de la voie doit donc répondre aux exigences simultanées de ces deux types de trafic, ce qui conditionne notamment le choix des rails, des traverses, du ballast et des rayons minimaux de courbure.

Tableaux 2 : Synthèse des caractéristiques techniques de la ligne

Paramètre	Valeur retenue	Justification
Catégorie de ligne	D4 (UIC)	Charge à l'essieu 25 t pour voyageurs Charge à l'essieu 32.5 t pour marchandise

Type de voie	Voie normale à ballast	Standard international
Trafic dominant	Fret minéralier	Exploitation Gara Djebilet
Trafic secondaire	Voyageurs régionaux	Desserte wilaya Tindouf
Mode de traction	Diesel (prévoir électrification)	Absence de réseau électrique

2.4. Vitesse de référence

La vitesse de référence d'une ligne ferroviaire est la vitesse maximale pour laquelle la ligne est conçue et qui conditionne l'ensemble des paramètres géométriques de la voie (rayons de courbure, déclivités, longueur des raccordements). Pour la ligne Béchar — Gara Djebilet, les vitesses de référence retenues sont différentes selon le type de trafic :

Tableaux 3 : Vitesses de référence et vitesses commerciales par type de train

Type de train	Vitesse de référence	Vitesse commerciale
Trains de voyageurs	120 km/h	90 – 100 km/h
Trains de fret léger	100 km/h	80 km/h
Trains minéraliers (lourds)	80 km/h	60 – 70 km/h
Trains de travaux et maintenance	60 km/h	40 km/h

La vitesse de 120 km/h pour les voyageurs est cohérente avec les standards UIC pour les lignes de cette catégorie et permet d'assurer un temps de parcours raisonnable sur cette longue distance. La vitesse de 80 km/h pour les trains minéraliers est dictée par la charge à l'essieu élevée (25 tonnes) et les contraintes de sécurité dans les zones de forte déclivité.

2.5. Écartement de la voie

L'écartement de la voie est la distance entre les faces internes des deux rails mesurés à 14 mm sous le plan de roulement. Pour la ligne Béchar — Gara Djebilet, le choix s'est porté sur la voie normale, dont l'écartement standard est de 1 435 mm. Ce choix est conforme à la politique nationale de standardisation du réseau ferroviaire algérien sur la voie normale.

La voie normale de 1 435 mm présente plusieurs avantages décisifs dans le cadre de ce projet : interopérabilité avec le réseau national existant, disponibilité des matériels roulants sur le marché mondial, optimisation de la capacité de transport grâce à des wagons de plus grande largeur, et facilité de maintenance avec des équipements standardisés.

Tableaux 4 : Paramètres géométriques fondamentaux de la voie

Paramètre	Valeur
Écartement nominal	1 435 mm (voie normale)
Tolérance en exploitation	+6 mm / -3 mm
Dévers maximal	160 mm
Insuffisance de dévers max	130 mm (voyageurs) / 100 mm (fret)
Jeu entre rail et roue	5 à 16 mm (selon profil de roue)

2.6. Normes et règlements utilisés

La conception et la réalisation de la ligne Béchar — Gara Djebilet s'appuient sur un corpus de normes et règlements techniques nationaux et internationaux, assurant la conformité de l'ouvrage aux standards de qualité et de sécurité les plus élevés.

- Normes UIC (Union Internationale des Chemins de Fer) : UIC 510, UIC 518, UIC 713, UIC 719, UIC 720, UIC 721.
- Norme EN 13674 : Spécifications des rails pour voies ferrées.
- Norme EN 13230 : Spécifications des traverses en béton.
- Règlement Technique Ferroviaire Algérien (RTFA) — édition ANESRIF.
- SNCF IN 2728 : Règlement sur la conception des lignes ferroviaires nouvelles.
- Normes DTR algériennes pour les ouvrages géotechniques et hydrauliques.
- Normes ISO 9001 :2015 pour le management de la qualité sur chantier.

3. Données de base

3.1. Données topographiques

Les données topographiques constituent la base géométrique de toute étude ferroviaire. Elles permettent de définir le tracé en plan, le profil en long et le profil en travers de la future ligne. Pour le projet Béchar — Gara Djebilet, les données topographiques ont été obtenues par

combinaison de plusieurs sources : levés topographiques terrestres le long du tracé préférentiel, données de télédétection satellitaire (modèles numériques de terrain SRTM et ASTER), et photographies aériennes de haute résolution.

Le terrain traversé présente un relief globalement peu accidenté dans la partie centrale du tracé (plateaux désertiques), mais plus contrasté dans les zones de transition au nord (région de Béchar, vallée de la Saoura) et à l'approche de la zone de Gara Djebilet au sud. Les altitudes varient de 450 m (zone de Tindouf) à 900 m (région de Béchar).

Tableaux 5 : Données topographiques et caractéristiques géométriques du tracé

Paramètre topographique	Valeur	Zone concernée
Altitude point de départ (Béchar)	770 m NGF	Béchar
Altitude point d'arrivée (G. Djebilet)	450 m NGF	Tindouf
Altitude maximale du tracé	920 m NGF	Région de Béchar
Altitude minimale du tracé	430 m NGF	Dépression Tindouf
Déclivité maximale retenue	12 ‰	Tous tronçons
Rayon minimal de courbure	1 000 m	Zones de relief



Figure 3 Matériel de levé topographique : station totale Leica TS06+.



Figure 4 :GPS professionnel

3.2. Données géotechniques

Les données géotechniques sont indispensables pour le dimensionnement des terrassements, des fondations des ouvrages d'art et des couches de forme de la voie. Une campagne de reconnaissance géotechnique a été réalisée le long du tracé, comprenant des sondages carottés, des essais de pénétration et des analyses de laboratoire sur les échantillons prélevés.

Les formations géologiques rencontrées le long du tracé sont variées. Dans la zone nord (Béchar-Abadla), on trouve principalement des formations alluviales et des roches sédimentaires (grès, calcaires). Dans la zone centrale, les terrains sont dominés par les ergs (sables éoliens) et les regs (surfaces caillouteuses). Dans la zone sud (approche de Gara Djebilet), les formations métamorphiques précambriennes du Bouclier Reguibat constituent un sous-sol rocheux favorable à la fondation des ouvrages.

Tableaux 6 : Typologie des sols sahariens et préconisations de traitement

Type de formation	Portance (CBR)	Action recommandée
Roches compactes (calcaires, grès)	> 80 %	Décapage superficiel — fondation directe
Alluvions graveleuses	30 – 60 %	Compactage — couche de forme 30 cm
Sables éoliens (ergs)	5 – 15 %	Substitution ou traitement à la chaux
Regs (caillouteux)	40 – 70 %	Mise en œuvre après réglage
Sebkhas (argiles salines)	< 5 %	Substitution totale — fondations profondes
Limons désertiques	10 – 25 %	Traitement au ciment — couche de forme 50 cm

**Figure 5** : Travaux de carottage

3.3. Données hydrologiques

Le contexte hydrologique de la zone d'étude est caractéristique du climat saharien : absence quasi-totale de cours d'eau permanents, réseau hydrographique constitué de oueds temporaires qui ne s'écoulent que lors des rares épisodes pluvieux. Malgré la rareté des pluies, les crues peuvent être violentes et soudaines, et constituent un risque majeur pour les infrastructures ferroviaires.

Les études hydrologiques ont porté sur l'identification et la caractérisation de l'ensemble des oueds susceptibles d'interférer avec le tracé de la ligne. Des calculs hydrologiques ont été

réalisés pour déterminer les débits de crue de référence (crue centennale Q100), permettant le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (buses, ponceaux, ponts).

Tableaux 7 : Synthèse hydrologique et ouvrages de franchissement hydraulique

Oued principal	Bassin versant (km ²)	Q100 estimé (m ³ /s)	Ouvrage prévu
Oued Béchar	8 500	850	Pont à 3 travées de 30 m
Oued Guir	12 000	1 200	Pont à 4 travées de 35 m
Oued Draa	6 800	680	Pont à 3 travées de 25 m
Petits oueds	< 500	< 120	Buses Ø 1,5 m — 2,0 m
Oueds temporaires	< 100	< 50	Dalots 1,0×1,0 m

3.4. Données climatiques

Le climat de la zone traversée par la ligne est de type saharien continental, caractérisé par des étés extrêmement chauds et secs, des hivers relativement froids, une pluviométrie annuelle très faible et des vents forts chargés de sable. Ces conditions climatiques imposent des contraintes spécifiques sur la conception, la construction et la maintenance de l'infrastructure ferroviaire.

Tableaux 8 : Paramètres climatiques extrêmes et leurs impacts sur les infrastructures

Paramètre climatique	Valeur caractéristique	Impact sur le projet
Température maximale estivale	+48 °C (rail > +65 °C)	Dilatation thermique des LRS
Température minimale hivernale	-5 °C	Contraction des LRS — risque de rupture
Amplitude thermique journalière	25 à 35 °C	Fatigue thermique des rails
Pluviométrie annuelle	< 50 mm/an	Drainage minimal — risque de crues
Vitesse maximale du vent	80 à 120 km/h	Ensemblement — stabilité des trains

Humidité relative	5 à 20 %	Corrosion accélérée du métal
Rayonnement solaire	Très élevé	Vieillessement accéléré des matériaux

La principale contrainte climatique pour la conception des rails est la dilatation thermique. Pour des Longs Rails Soudés (LRS), la température de pose neutre (température à laquelle le rail n'est ni en traction ni en compression) doit être soigneusement définie pour éviter tout risque de flambage en été ou de rupture en hiver. Dans le contexte saharien, cette température est généralement fixée entre +30 °C et +35 °C.

3.5. Données de trafic

Les données de trafic constituent l'un des éléments déterminants pour le dimensionnement de la ligne. Pour le projet Béchar — Gara Djebilet, le trafic attendu est de deux natures distinctes : le trafic de marchandises (principalement le minerai de fer de Gara Djebilet) et le trafic de voyageurs (dessertes régionales).

Les estimations de trafic ont été établies sur la base des études de marché réalisées par l'ANESRIF et le Ministère des Mines, tenant compte des prévisions de production du gisement de Gara Djebilet et des projections de croissance démographique dans la région.

Tableaux 9 : Projections de trafic et évolution de la capacité d'exploitation (2030–2050)

Type de trafic	Horizon 2030	Horizon 2040	Horizon 2050
Minerai de fer (Mt/an)	15 Mt	30 Mt	50 Mt
Voyageurs (milliers/an)	120 k	250 k	400 k
Trains minéraliers (trains/jour)	4	8	13
Trains voyageurs (trains/jour)	2	4	6
Charge par train minéralier (t)	3 750 t	3 750 t	5 000 t



Figure 6 : Train minéralier en zone désertique — illustration du trafic fret

4. Conclusion :

Ce premier chapitre a permis d'établir le cadre fondamental du projet ferroviaire reliant Béchar à Gara Djebilet, un axe stratégique pour le développement économique et minier du Grand Sud-Ouest algérien. L'analyse exhaustive des données de base a mis en exergue la complexité inhérente à la conception d'une ligne à trafic mixte (LPFV) en environnement désertique.

La synthèse des paramètres techniques — incluant les choix de tracé, les standards géométriques (voie normale de 1 435 mm), et le respect des normes internationales (UIC, EN) — démontre la nécessité d'une ingénierie de précision pour répondre aux exigences duales de transport : le fret minéralier lourd et le transport de voyageurs.

Par ailleurs, l'étude des contraintes environnementales a souligné les défis majeurs que le milieu saharien impose à l'infrastructure. La vulnérabilité des installations face aux amplitudes thermiques extrêmes, les risques hydrologiques liés aux crues torrentielles, ainsi que les spécificités géotechniques des sols (alluvions, ergs et regs) constituent autant de paramètres critiques qui conditionneront les choix constructifs des chapitres suivants. Enfin, les projections de trafic à l'horizon 2050 confirment le dimensionnement ambitieux du projet, justifiant ainsi l'exigence de robustesse et de pérennité des ouvrages.

En somme, ces données de base posent les jalons nécessaires à la définition des méthodes de construction et des solutions techniques qui seront développées dans la suite de ce travail, visant à garantir une exploitation ferroviaire sécurisée et performante dans des conditions géographiques extrêmes.

Chapitre 2

Étude de Trafic et de Capacité

Chapitre 2 : Étude de Trafic et de Capacité

1. Introduction :

L'étude du trafic et de capacité constitue une étape fondamentale dans la conception d'une infrastructure ferroviaire. Elle permet de quantifier les flux de transport attendus, de dimensionner correctement la ligne en termes de capacité et de débit, et de justifier les choix techniques retenus. Pour la ligne Béchar — Gara Djebilet, cette étude revêt une importance particulière en raison de la dominance du trafic minéralier, qui impose des contraintes spécifiques sur la résistance de la voie et la capacité de transport.

2. Analyse de la demande :

2.1. Méthodologie d'analyse :

L'analyse de la demande a été réalisée selon une approche combinant la méthode des études de génération de trafic (pour le fret minéralier, directement lié aux prévisions de production de Gara Djebilet) et la méthode des modèles de demande socio-économique (pour les voyageurs, basée sur les données démographiques et économiques de la région).

Pour le trafic de fret, la demande est essentiellement déterminée par la capacité de production du gisement de Gara Djebilet et par la demande en minerai de fer des complexes sidérurgiques algériens (El-Hadjar à Annaba) et des marchés d'exportation (via les ports d'Oran, Arzew ou Bejaia).

2.2. Zone d'influence de la ligne :

La zone d'influence directe de la ligne Béchar — Gara Djebilet comprend les wilayas de Béchar, Adrar et Tindouf, dont la population totale est estimée à environ 650 000 habitants (recensement 2023). La zone d'influence indirecte s'étend aux wilayas voisines (Naama, El Bayadh, Biskra) dont les populations peuvent bénéficier de connexions intermodales avec la ligne.

Tableaux 10 : Données démographiques des wilayas desservies et structure des gares

Wilaya	Population (2023)	Distance à la ligne	Niveau de desserte prévu
Béchar	320 000 hab.	Point de départ	Gare principale + dépôt
Adrar	220 000 hab.	~200 km	Connexion routière — gare intermédiaire

Tindouf	110 000 hab.	Point d'arrivée	Gare principale + terminal minéralier
---------	--------------	-----------------	---------------------------------------

3. Prévisions du trafic voyageurs et marchandises

3.1. Trafic de marchandises

Le gisement de Gara Djebilet est évalué à 3,5 milliards de tonnes de minerai de fer à une teneur moyenne de 55 à 62 % en fer. La montée en puissance de l'exploitation est prévue en trois phases successives, chacune correspondant à un niveau de production et de trafic ferroviaire spécifique.

Tableaux 11 : Planning de montée en charge de la production minéralière et cadencement des trains

Phase	Période	Production annuelle	Trains minéraliers/jour	Composition du train
Phase 1	2026 – 2030	15 Mt/an	4 trains/jour	150 wagons × 50 t = 3 750 t/train
Phase 2	2031 – 2040	30 Mt/an	8 trains/jour	150 wagons × 50 t = 3 750 t/train
Phase 3	2041 – 2050	50 Mt/an	13 trains/jour	200 wagons × 50 t = 5 000 t/train

Le calcul du nombre de trains nécessaires par jour est réalisé comme suit pour la Phase 1 :

Tonnage annuel = 15 000 000 t/an

Jours d'exploitation = 330 jours/an (arrêts maintenance inclus)

Tonnage journalier = $15\,000\,000 / 330 \approx 45\,500$ t/jour

Capacité d'un train = 3 750 t → Nombre de trains = $45\,500 / 3\,750 \approx 12$ trains dans les deux sens, soit 6 trains aller + 6 trains retour (vides), ou 4 trains chargés + 4 trains vides selon le sens de calcul.

3.2. Trafic voyageurs

Le trafic de voyageurs sur la ligne Béchar — Gara Djebilet est actuellement inexistant en raison de l'absence de desserte ferroviaire. Les projections ont été établies sur la base des flux actuels de transport routier entre Béchar et Tindouf, auxquels s'ajoute le trafic induit par la mise en service de la ligne.

Tableaux 12 : Évolution des prévisions de trafic voyageurs et cadencement du service

Horizon	Voyageurs/an	Voyageurs/jour	Trains/jour (aller)	Capacité par train
2028 (ouverture)	80 000	220	1 train	300 pl. — 4 voitures
2030	120 000	360	1 train	400 pl. — 5 voitures
2035	200 000	600	2 trains	400 pl. — 5 voitures
2040	350 000	1 050	3 trains	400 pl. — 5 voitures
2050	500 000	1 500	4 trains	400 pl. — 5 voitures

4. Choix de la vitesse : Justifications techniques et économiques

4.1 Critères de choix de la vitesse

Le choix de la vitesse de référence d'une ligne ferroviaire résulte d'un arbitrage entre plusieurs critères parfois antagonistes : la réduction du temps de parcours (qui plaide pour des vitesses élevées), les contraintes géométriques du tracé (rayons de courbure, déclivités), la nature du trafic dominant (fret lourd versus voyageurs rapides), le coût de construction et de maintenance, et les exigences de sécurité.

Pour la ligne Béchar — Gara Djebilet, le trafic dominant est le fret minéralier lourd, qui exige des conditions mécaniques sévères (charge à l'essieu de 25 tonnes) mais n'est pas sensible au facteur temps de la même manière que les voyageurs. Ce contexte oriente le choix vers une vitesse de référence modérée, optimisée pour le fret lourd.

4.2. Analyse comparative des scénarios de vitesse :

Le Scénario B ($V = 120$ km/h) est retenu car il offre le meilleur compromis entre le temps de parcours pour les voyageurs, les contraintes géométriques du terrain saharien et le coût d'investissement. Cette vitesse est compatible avec les exigences du trafic fret lourd et permet d'envisager à terme une augmentation de la vitesse voyageurs par simple amélioration du matériel roulant

Tableaux 13 : Analyse comparative des scénarios de tracé et justification du choix technique

Scénario	V ref.	Rayon min.	Coût relatif	Temps parcours (950 km)	Recommandation
Scénario A	80 km/h	600 m	Base 100	11h50 (voyageurs) 13h30 (fret)	Non retenu
Scénario B	120 km/h	1 000 m	Base 115	8h45 (voyageurs) 13h30 (fret)	Retenu ✓
Scénario C	160 km/h	2 500 m	Base 145	6h30 (voyageurs) —	Non retenu
Scénario D	200 km/h	4 500 m	Base 200	4h45 (voyageurs) —	Non retenu

4.3. Impact de la vitesse sur les paramètres de voie

Tableaux 14 : Influence de la vitesse de référence sur les paramètres géométriques de la voie

Paramètre géométrique	$V = 80$ km/h	$V = 120$ km/h (retenu)	$V = 160$ km/h
Rayon minimal (plan)	600 m	1 000 m	2 500 m
Déclivité maximale	15 ‰	12 ‰	10 ‰
Dévers maximal	150 mm	160 mm	160 mm
Longueur min. de raccordement	50 m	80 m	130 m
Espacement minimal des trains	5 min	6 min	8 min

5. Capacité de la ligne : Espacement des trains et débit journalier

5.1. Définition de la capacité :

La capacité d'une ligne ferroviaire est le nombre maximum de trains pouvant circuler dans une direction donnée pendant une période de référence (généralement une heure ou une journée), dans le respect des règles de sécurité et des performances de la signalisation. Elle est directement conditionnée par l'espacement minimal entre deux trains successifs.

5.2 Calcul de l'intervalle minimal entre trains

L'intervalle minimal entre deux trains successifs dépend du système de signalisation adopté, de la distance de freinage des trains et des performances de l'infrastructure. Pour une ligne équipée du Bloc Automatique Lumineux (BAL) avec des cantons de longueur moyenne de 2 km, l'intervalle minimal est calculé comme suit :

Distance de freinage (train minéralier à 80 km/h) ≈ 900 m

Longueur du train minéralier (150 wagons + locomotives) $\approx 1\,800$ m

Longueur du canton de signalisation = 2 000 m (2 km)

Nombre de cantons de sécurité = 2 cantons minimum

$$\begin{aligned} \text{Intervalle minimal} &\approx (\text{longueur train} + 2 \text{ cantons}) / \text{vitesse} \\ &= (1800 + 4000) / 80 \times 3,6 \approx 8,5 \text{ min} \approx 9 \text{ min} \end{aligned}$$

5.3. Capacité théorique et pratique de la ligne :

Tableaux 15 : Synthèse de la capacité de circulation et limites de l'exploitation ferroviaire

Paramètre de capacité	Valeur calculée	Observations
Intervalle minimal (trains fret)	9 min	BAL — cantons 2 km
Capacité théorique (fret)	6,7 trains/h sens	Limite théorique signalisation
Capacité pratique (fret)	4 trains/h sens	Après coefficient d'utilisation 60 %
Capacité journalière (fret)	60 trains/j sens	Exploitation 15h/jour
Intervalle minimal (voyageurs)	6 min	Trains légers — freinage court
Capacité pratique (voyageurs)	6 trains/h sens	Trafic voyageurs seul
Capacité mixte (fret + voyageurs)	35-40 trains/j	Phase 3 — tous types confondus

La capacité pratique de la ligne en Phase 1 (4 à 6 trains/jour dans chaque sens) est largement suffisante pour absorber les besoins de trafic prévisionnels à l'horizon 2030 (4 trains minéraliers/jour + 1 train voyageurs/jour). Des voies de croisement (évitements) seront aménagées tous les 30 à 50 km pour permettre le croisement et le dépassement des trains.



Figure 7 : train de Gara Djebilet

6. Temps de parcours

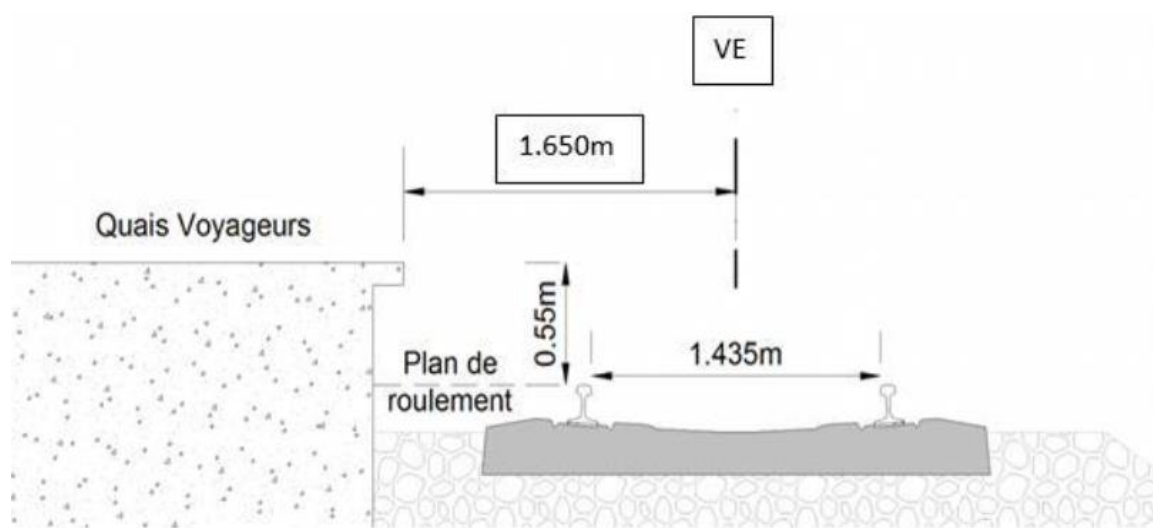
6.1. Méthodologie de calcul

Le calcul des temps de parcours tient compte des vitesses de référence de chaque type de train, des arrêts commerciaux en gare, des ralentissements imposés par la géométrie de la voie (courbes, zones de chantier) et des marges réglementaires de régularité (généralement 5 % du temps de marche).

6.2. Gares et points d'arrêt prévus

Tableaux 16 : Schéma d'exploitation : liste des gares, pointage kilométrique et temps d'arrêt

Gare / Point kilométrique	PK	Type de gare	Temps d'arrêt prévu
Béchar	PK 0	Gare principale	20 min (origine)
Abadla	PK 90	Gare intermédiaire	5 min
Beni Ounif	PK 270	Gare intermédiaire	5 min
Aïn Ben Khelil	PK 520	Gare intermédiaire + évitement	8 min
Oum El Assel	PK 750	Gare intermédiaire	5 min
Gara Djebilet	PK 950	Terminal minéralier + gare	30 min (terminus)


Figure 8 : section type de la gare

6.3. Estimation des temps de parcours

Tableaux 17 : Synthèse des temps de parcours et performances opérationnelles par type de train

Type de train	Distance	Vitesse moyenne	Temps de marche	Arrêts	Temps total
Train voyageurs express	950 km	95 km/h	10h00	45 min	10h45
Train voyageurs omnibus	950 km	75 km/h	12h40	1h10	13h50
Train minéralier chargé	950 km	65 km/h	14h37	40 min	15h17
Train minéralier à vide	950 km	80 km/h	11h53	30 min	12h23
Train de travaux	950 km	40 km/h	23h45	Variable	> 24h

Ces estimations constituent des valeurs indicatives de dimensionnement. Les horaires précis seront établis lors de l'élaboration du graphique de circulation, en tenant compte de l'ensemble des contraintes d'exploitation (croisements en gare, priorités entre trains, disponibilité des voies de service).

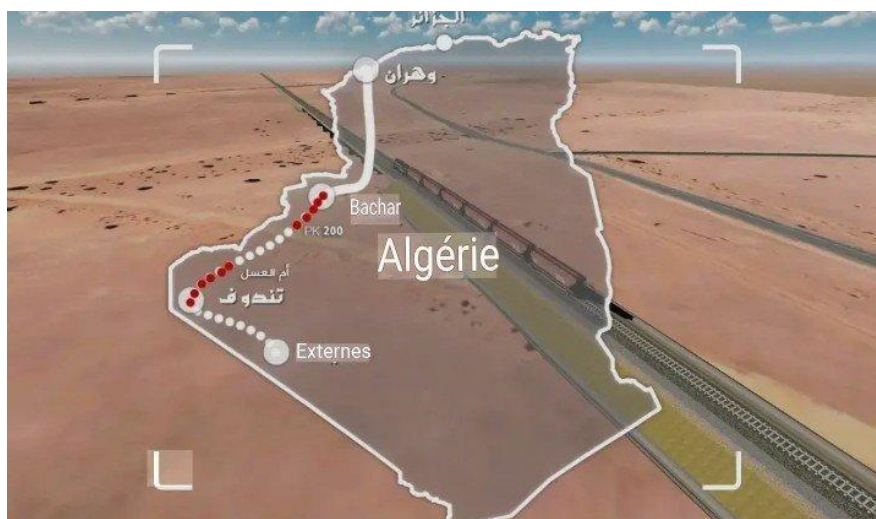


Figure 9 : Infrastructure ferroviaire sur viaduc — Qualité de l'ouvrage terminé

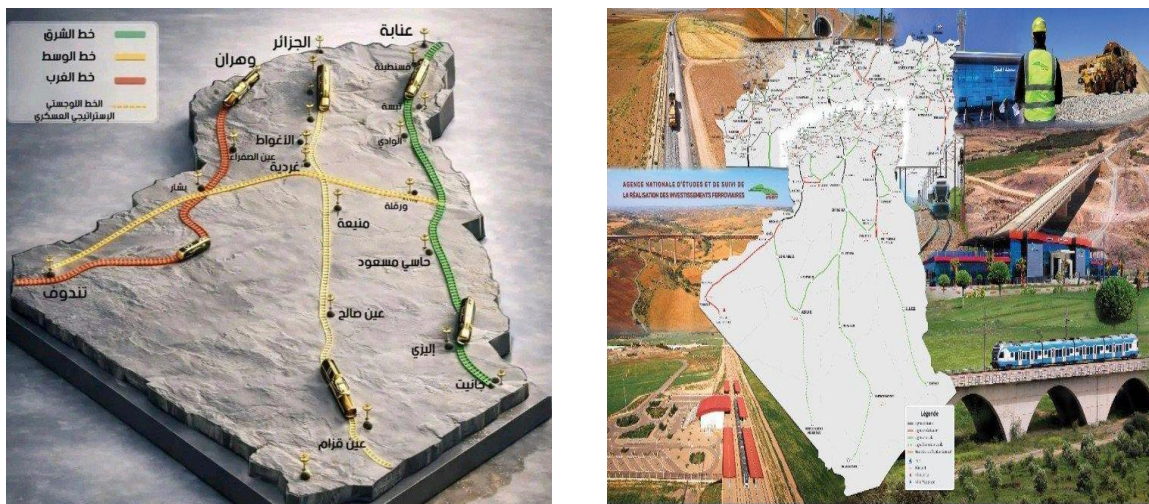


Figure 10 : Réseau ferroviaire algérien (gauche) | Programme ANESRIF (droite)

7. Conclusion :

L'étude de trafic et de capacité réalisée pour la ligne ferroviaire Béchar — Gara Djebilet démontre la viabilité technique et opérationnelle d'un projet dont l'ambition dépasse le simple transport de minerai. L'analyse a permis de confirmer que la structure de la ligne, dimensionnée pour une vitesse de référence de 120 km/h, offre le compromis optimal pour satisfaire, de manière durable, les besoins contrastés du fret minéralier lourd et des déplacements régionaux des populations.

La planification rigoureuse en trois phases de développement garantit non seulement l'absorption progressive de la production minière — atteignant 50 Mt/an à l'horizon 2050 — mais aussi une flexibilité nécessaire à l'évolution du trafic voyageurs. Grâce à l'adoption du système de signalisation BAL et à l'implantation stratégique des voies d'évitement, la ligne assure une gestion fluide des flux, minimisant les conflits de circulation entre les différents types de convois. En somme, les paramètres définis dans ce chapitre établissent un socle solide pour l'exploitation future, transformant une contrainte géographique saharienne en une infrastructure performante, capable de soutenir le développement industriel et socio-économique de l'Algérie pour les décennies à venir.

Chapitre 3
Étude de la
Plateforme et des
Terrassements

CHAPITRE 3 : ÉTUDE DU TRACÉ FERROVIAIRE

1. Introduction :

Ce chapitre constitue le cœur du mémoire. Il développe l'étude géométrique complète du tracé ferroviaire pour le sous-tronçon du PK 740+000 au PK 750+000 de la ligne Béchar–Tindouf (Gara Djebilet). Il couvre les trois composantes fondamentales de tout tracé ferroviaire : le tracé en plan (alignements droits, courbes circulaires, clothoïdes et dévers), le profil en long (pentes, raccordements verticaux et confort dynamique), et le profil en travers (plateforme, talus, assainissement, stabilité et volumes de terrassement). Toutes les caractéristiques sont établies conformément aux normes UIC 703 R, ENV 13803 et au référentiel technique SNTF. Le tracé est conçu pour un trafic mixte : trains voyageurs à 160 km/h et trains minéraliers (minerai de fer de Gara Djebilet) à 70 km/h avec une charge par essieu de 32,5 t. Ce double objectif impose des exigences parfois contradictoires sur les paramètres géométriques, notamment le dévers en courbe, et nécessite une démarche d'optimisation rigoureuse. Les calculs sont réalisés sur la base des listings d'axe en plan, de profil en long, d'implantation et de terrassements extraits du Rapport DEX du Bureau SETO (Novembre 2023, Version 00).

2. Tracé en Plan :

Le tracé en plan est la projection horizontale de l'axe de la voie sur un plan géodésique de référence. Il est défini par une succession de trois types d'éléments géométriques : des alignements droits, des arcs circulaires et des courbes de transition (clothoïdes). Ces éléments sont enchaînés de façon à assurer la continuité de la courbure et de sa dérivée, garantissant ainsi la fluidité du tracé et le confort des passagers.

La conception du tracé en plan sur ce sous-tronçon de 10 km se caractérise, selon le Rapport DEX SETO, par des alignements droits dans la quasi-totalité du tracé, avec une seule courbe circulaire significative de rayon 3 000 m, destinée à assurer le franchissement en sécurité et en confort à 160 km/h pour les trains voyageurs, tout en limitant l'usure des rails sous les trains minéraliers lourds.

2.1. Situation géographique du projet :

La ligne ferroviaire Béchar–Tindouf (Ghara Djebilet) constitue un axe stratégique reliant la ville de Béchar au gisement de minerai de fer de Ghara Djebilet, situé dans la wilaya de Tindouf, au sud-ouest de l'Algérie. Le sous-tronçon PK 740+000 / PK 750+000 traverse un territoire

désertique (Erg / Reg saharien) caractérisé par un relief peu accidenté avec des altitudes oscillant entre 424 m et 434 m NGF

L'équipement mobilisé pour les levés est le suivant :

Tableau 18 — Équipements topographiques déployés sur le Tronçon N°04

N°	Désignation	Référence / Modèle	Caractéristiques
01	Station GPS RTK	Leica GS18 (×2)	Précision plan. ± 8 mm + 1 ppm
02	Récepteur GPS	Leica GS10 (×1)	Mode statique & cinématique
03	Station totale	Leica TS09 (×1)	Précision angl. 3", dist. ± 2 mm
04	Station totale	Leica TS06+ (×1)	Précision angl. 5", dist. ± 2 mm
05	Logiciel topographique	Leica Geo Office / AutoCAD Civil 3D	Traitement & modélisation 3D

2.2. Système de coordonnées :

Le système de référence géodésique adopté pour l'ensemble du projet est :

- Système géodésique : UTM 29 Nord — WGS 84
- Ellipsoïde de référence : WGS 1984
- Projection : UTM Fuseau 29 Nord
- Facteur d'échelle combiné moyen (sous-tronçon) : $0.99964 \approx 1 / 2\,780$

2.3 Réalisation des levés topographiques :

2.3.1 Polygonale principale et vérifications :

Trente-sept (37) stations de la polygonale principale et secondaire (phase APD) ont été vérifiées sur le terrain par comparaison entre les coordonnées théoriques et les valeurs observées en mode RTK. Les écarts obtenus sont conformes aux tolérances exigées.

2.3.2 Polygonale secondaire intermédiaire :

Deux-cent-cinquante-huit (258) stations secondaires intermédiaires ont été matérialisées sur le terrain par des bornes en béton et observées par GPS en double lecture (lecture directe et BIS). Cette double observation garantit la détection des erreurs grossières et assure la redondance des mesures.

- Méthode : GPS statique rapide (double lecture directe / BIS)
- Espacement moyen entre bornes : ≈ 300 m
- Levée du terrain : tous les 25 m en long et 80 m en travers
- Implantation de l'axe projet : tous les 100 m sur 78 km de linéaire

2.4 Listing des stations et facteur d'échelle :

Le tableau ci-dessous présente l'extrait du listing des stations secondaires couvrant le sous-tronçon PK 740+000 — PK 750+000. Les coordonnées sont exprimées en mètres dans le système UTM 29 Nord / WGS 84.

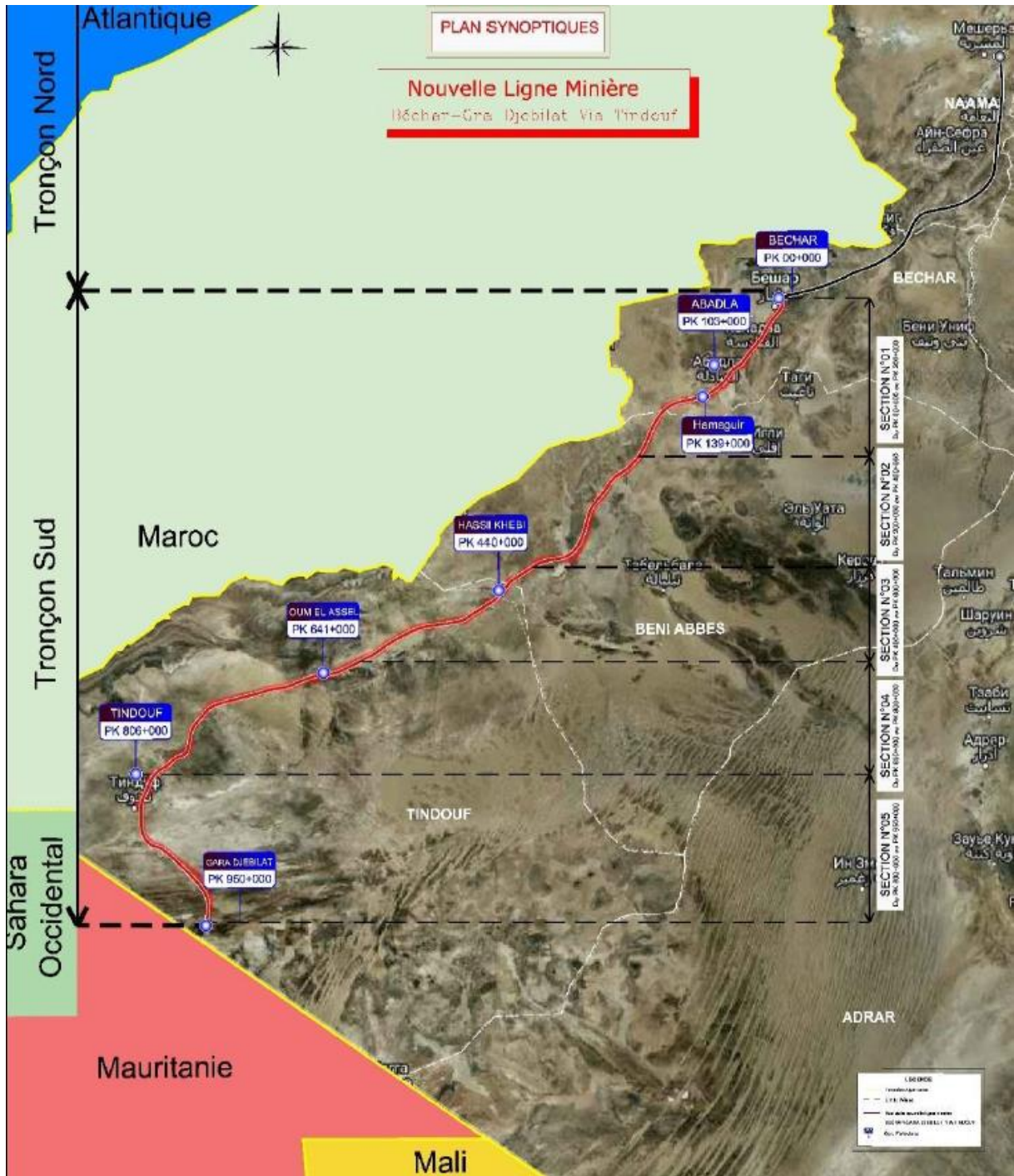


Figure 11 : situation de projet

2.5 DONNE GEODESIQUES :

Le tableau suivant récapitule les 40 stations de la polygonale secondaire constituant le sous-tronçon PK 740+000 au PK 750+000 (stations P20 à P59). Les altitudes sont exprimées en mètres NGF.

Tableau 19 : Stations de la polygonale secondaire — PK 740+000 / PK 750+000 (Système UTM 29 N / WGS 84)

Borne	X (m)	Y (m)	Z (m)	PK approximatif
P20	591 378.099	3 069 788.675	432.693	PK ~740+084
P21	591 307.704	3 070 075.528	434.222	PK ~740+379
P22	591 495.966	3 070 311.833	433.959	PK ~740+606
P23	591 421.785	3 070 611.584	433.124	PK ~740+916
P24	591 701.344	3 070 683.978	431.844	PK ~741+087
P25	591 718.973	3 070 967.039	427.656	PK ~741+277
P26	592 010.780	3 071 119.093	428.137	PK ~741+533
P27	592 124.645	3 071 419.081	431.939	PK ~741+765
P28	592 411.905	3 071 486.791	432.257	PK ~741+997
P29	592 624.381	3 071 699.401	431.788	PK ~742+227
P30	592 898.180	3 071 736.814	431.388	PK ~742+215
P31	593 132.310	3 071 944.225	431.562	PK ~742+511
P32	593 554.471	3 072 157.189	431.107	PK ~742+878
P33	593 865.208	3 072 197.824	430.462	PK ~743+163
P34	594 080.987	3 072 387.315	430.298	PK ~743+448
P35	594 389.247	3 072 434.266	428.771	PK ~743+331
P36	594 612.849	3 072 648.987	427.597	PK ~743+615
P37	594 903.147	3 072 705.070	427.767	PK ~743+782
P38	595 084.270	3 072 949.782	428.260	PK ~744+081
P39	595 354.421	3 073 071.259	427.479	PK ~744+306
P40	595 441.999	3 073 352.750	428.801	PK ~744+598
P41	595 675.325	3 073 551.163	428.917	PK ~744+878
P42	595 705.015	3 073 845.886	429.275	PK ~745+156
P43	595 858.764	3 074 090.326	428.832	PK ~745+443
P44	595 833.167	3 074 379.862	428.635	PK ~745+693
P45	595 975.180	3 074 637.509	426.686	PK ~745+987
P46	595 882.715	3 074 918.846	425.643	PK ~746+203
P47	596 077.808	3 075 128.610	424.556	PK ~746+475
P48	596 031.137	3 075 432.185	425.890	PK ~746+733
P49	596 192.022	3 075 694.151	426.476	PK ~747+037
P50	596 123.525	3 075 967.427	425.572	PK ~747+261
P51	596 219.696	3 076 486.698	426.137	PK ~747+762
P52	596 374.917	3 076 752.206	426.810	PK ~748+026
P53	596 331.843	3 077 038.862	427.340	PK ~748+296
P54	596 479.234	3 077 291.615	427.216	PK ~748+516
P55	596 435.260	3 077 592.236	428.015	PK ~748+880
P56	596 582.612	3 077 860.200	428.045	PK ~749+147
P57	596 570.509	3 078 177.931	428.431	PK ~749+431
P58	596 792.387	3 078 374.459	427.263	PK ~749+680
P59	596 787.875	3 078 585.101	427.478	PK ~749+895

2.6 FICHES SIGNALÉTIQUES DES STATIONS EXTRAITS :

Les fiches signalétiques des stations comprennent : la situation géographique extraite de Google Earth, une vue de près et une vue d'ensemble de la borne matérialisée sur terrain, ainsi que les coordonnées précises dans le système UTM 29 Nord / WGS 84.

2.6.1 Station P20 — Début du sous-tronçon (PK ~740+084) :

Nom De La Borne: P20		AXE	Observé par: SETO
Situation Géographique Image Extraite De Google Earth			
			
Vue de près		Vue D'ensemble	
			
Coordonnées De La Borne		Système Géodésique	
X[m]:591378.099 Y[m]:3069788.675 Z[m]:432.693 Facteur d'échelle combiné: F: 0.9996291311		Système Géodésique : UTM29 WGS84 Ellipsoïde : WGS 1984 Projection : UTM Fuseau 29 Nord	

Figure 12 : Fiche signalétique de la borne P20 (AXE) — PK ~740+084 — X : 591 378.099, Y : 3 069 788.675, Z : 432.693 m

2.6.2 Station P43 — Milieu du sous-tronçon (PK ~745+443) :

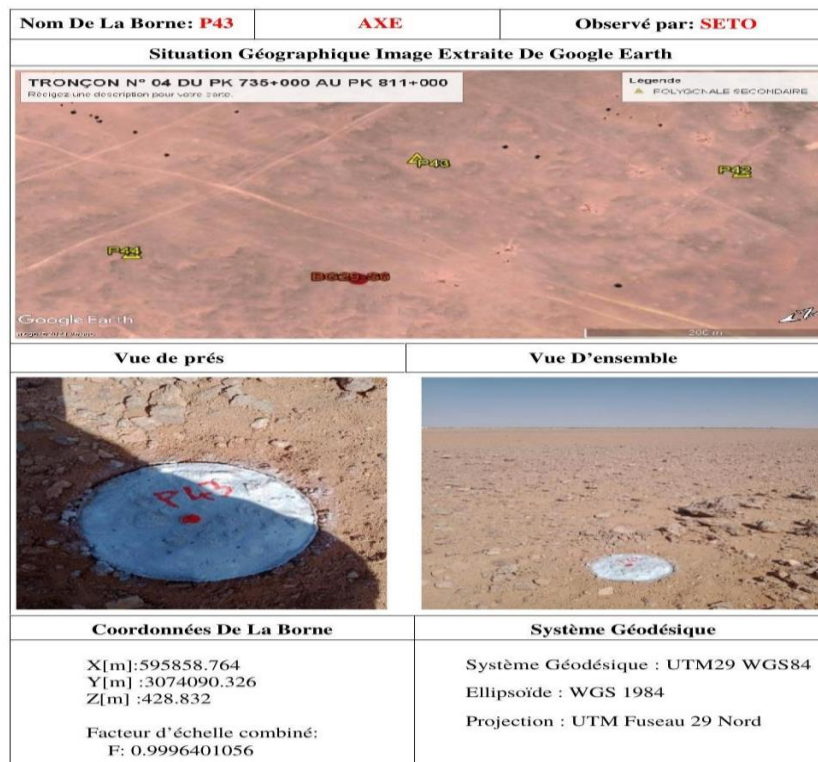


Figure 13 :Fiche signalétique de la borne P43 (AXE) — PK ~745+443 — X: 595 858.764, Y: 3 074 090.326, Z: 428.832 m

2.6.3 Station P50 — Fin du sous-troncon (PK ~747+261) :

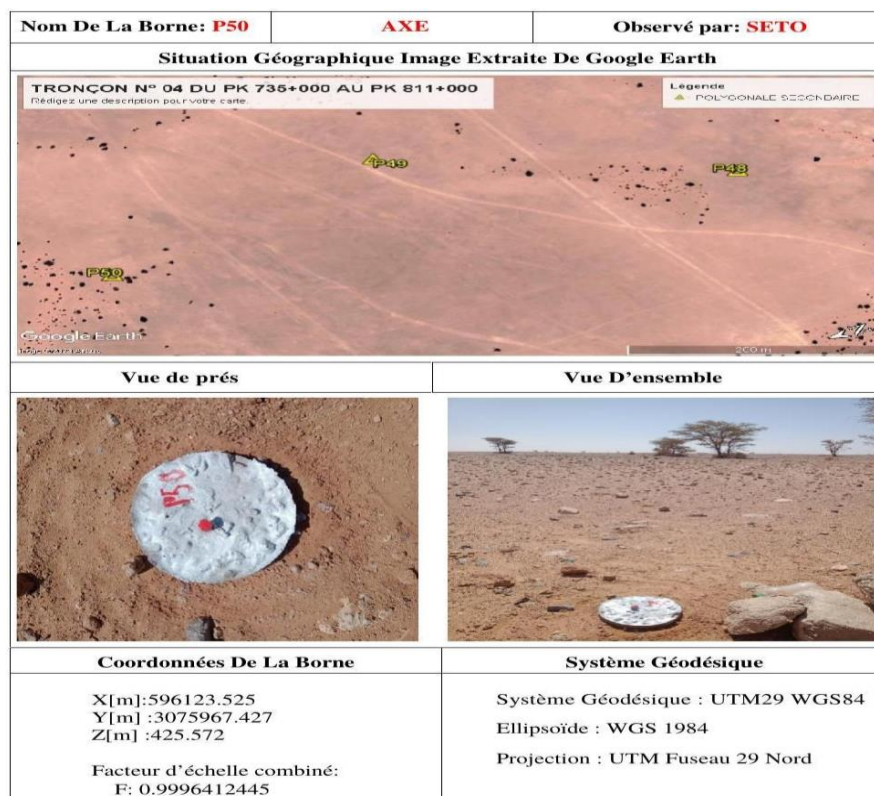


Figure 14 :Fiche signalétique de la borne P50 (AXE) — PK ~747+261 — X: 596 123.525, Y: 3 075 967.427, Z: 425.572 m

2.7 CONTRAINTES RENCONTRÉES SUR LE SOUS-TRONÇON :

2.7.1 Présence de fibres optiques :

Lors des travaux topographiques, une forte présence de câbles de fibre optique a été constatée dans la zone du sous-tronçon PK 740+000 / PK 750+000. L'intersection la plus significative dans cette zone est localisée aux PK 752+250 (à la limite aval du tronçon d'étude). Les tableaux suivants récapitulent l'ensemble des empiètements sur le tronçon complet. Note : Aucune fibre optique ne traverse directement l'axe du projet dans l'intervalle strict PK 740+000 / PK 750+000. La plus proche est signalée au PK 752+100–752+700 (600 m dans l'emprise des travaux).

2.7.2 Lignes électriques moyenne tension :

L'axe du projet traverse des lignes électriques de moyenne tension dans plusieurs points kilométriques. Aucun croisement n'est recensé dans le sous-tronçon PK 740+000 / PK 750+000 stricto sensu ; les intersections les plus proches se situent à PK 787+750 et PK 789+750.

2.8 PROFIL ALTIMÉTRIQUE — SOUS-TRONÇON PK 740+000 / PK 750+000 :

Le tracé altimétrique du sous-tronçon est établi à partir des altitudes Z (NGF) relevées sur les bornes de la polygonale secondaire. L'analyse des données montre :

- Altitude minimale : 424.556 m (Borne P47 — PK ~746+475)
- Altitude maximale : 434.222 m (Borne P21 — PK ~740+379)
- Dénivelée totale : 9.666 m sur 10 km
- Pente moyenne : 0.97 ‰ (compatible avec les exigences UIC pour ligne de marchandises)

Tableau 20 : Profil altimétrique par tranche kilométrique -PK 740+000 / PK 750+000

Tranche PK	Stations concernées	Z min (m)	Z max (m)	Dénivelée (m)
PK 740+000 — PK 741+000	P20 – P24	431.8	434.2	2.4

PK 741+000 — PK 742+000	P25 – P29	427.7	432.3	4.6
PK 742+000 — PK 743+000	P30 – P33	430.5	431.6	1.1
PK 743+000 — PK 744+000	P34 – P38	427.5	430.3	2.8
PK 744+000 — PK 745+000	P39 – P42	427.5	429.3	1.8
PK 745+000 — PK 746+000	P43 – P46	425.6	429.3	3.7
PK 746+000 — PK 747+000	P47 – P49	424.6	426.5	1.9
PK 747+000 — PK 748+000	P50 – P53	425.6	427.3	1.7
PK 748+000 — PK 749+000	P54 – P57	427.2	428.4	1.2
PK 749+000 — PK 750+000	P58 – P59	427.3	427.5	0.2

2.9. TRACÉ EN PLAN — DESCRIPTION DU SOUS-TRONÇON :

Le sous-tronçon PK 740+000 / PK 750+000 s'inscrit dans la partie centrale du Tronçon N°04.

Il présente les caractéristiques planimétriques suivantes :

Tableau 21 : Caractéristiques générales du tracé — PK 740+000 / PK 750+000

Paramètre	Valeur / Description
Longueur du sous-tronçon	10 000 m (10 km)
Coordonnée X début (PK 740+000)	≈ 591 378 m (Station P20)
Coordonnée X fin (PK 750+000)	≈ 596 787 m (Station P59)
Direction générale	NNE → NNO (orientation variable, tracé sinueux)
Relief traversé	Reg désertique à faible relief — Hamada
Nombre de bornes implantées	40 bornes (P20 à P59) — espacées ≈ 250 m
Fibre optique dans l'emprise	Néant dans le sous-tronçon strict (présence signalée à PK 752)
Lignes MT croisant l'axe	Aucune dans le sous-tronçon PK 740–750
Système de coordonnées	UTM 29 Nord — WGS 84

2.9.1 Description planimétrique détaillée :

En se basant sur les coordonnées UTM des bornes de la polygonale secondaire, le tracé peut être découpé en segments rectilignes successifs :

- PK 740+000 — PK 741+500 : Direction quasi-nord, légère inflexion vers le NNO. Stations P20 à P26, X variant de 591 378 à 592 011 m ($\Delta X = +633$ m), Y variant de 3 069 789 à 3 071 119 m ($\Delta Y = +1\,330$ m).
- PK 741+500 — PK 743+500 : Inflexion progressive vers le NNE. Stations P27 à P37, X croissant de 592 124 à 594 903 m ($\Delta X = +2\,779$ m).
- PK 743+500 — PK 746+500 : Virage vers le Nord-Nord-Est, avec variation longitudinale de Y de 3 072 950 à 3 075 129 m.
- PK 746+500 — PK 750+000 : Orientation générale vers le Nord, avec légère oscillation Est-Ouest des coordonnées X (596 031 à 596 792 m).

Ce tracé en plan est caractéristique des lignes ferroviaires en zone désertique : peu de virages prononcés, des alignements droits dominants, compatibles avec les vitesses de projet envisagées ($V = 80$ à 120 km/h pour le transport de minerai).

2.9.2 Longueur Minimale des Éléments de Tracé :

Pour amortir suffisamment le roulis de la caisse des véhicules lors des transitions entre éléments géométriques, des longueurs minimales sont imposées. Les doucines (arrondis du diagramme des flèches centrées sur une origine ou fin de raccordement progressif) ont des longueurs normales comprises entre 30 et 40 m, exceptionnellement 20 m.

Les longueurs minimales des alignements droits et des arcs circulaires (entre milieux de doucines) sont :

Valeur limite normale (N) :
$$M_{in} = \frac{V}{2} = \frac{160}{2} = 80 \text{ m}$$

Valeur limite exceptionnelle (E) :
$$M_{in} = \frac{V}{2} = \frac{160}{2} = 80 \text{ m}$$

Tableau 22 : Vérification des longueurs minimales des éléments de tracé

Élément	PK Début	PK Fin	Longueur (m)	L_min N (m)	L_min E (m)	Conformité
DR1 — Alignement droit 1	736+847	741+540	4 692,70	80	54	✓ (×58,7 Min)
CLO2 — Clothoïde entrée	741+540	741+600	60,00	—	—	✓
ARC3 — Arc circulaire R=3000	741+600	742+334	733,57	80	54	✓ (×9,2 Min)

CLO4 — Clothoïde sortie	742+334	742+394	60,00	—	—	✓
DR5 — Alignement droit 5	742+394	751+345	8 951,06	80	54	✓ (×111,9 L_min)

Tous les éléments du tracé en plan dépassent très largement les longueurs minimales réglementaires. La topographie saharienne plane de la zone d'étude explique la prédominance des longs alignements droits (DR1 : 4,7 km ; DR5 : 8,95 km).

2.9.3 Rayon Minimal des Courbes Circulaires :

La valeur du rayon minimal admissible est déterminée pour assurer, en fonction des vitesses de circulation, le confort des voyageurs et éviter que les efforts transversaux sur la voie ne soient trop importants. La détermination du rayon minimal résulte de deux critères simultanés :

- Pour la vitesse maximale $V_{max} = 160$ km/h : l'insuffisance de dévers I ne doit pas dépasser sa valeur maximale admissible.
- Pour la vitesse minimale $V_{min} = 70$ km/h : l'excès de dévers E ne doit pas dépasser sa valeur maximale admissible.

La relation fondamentale entre rayon R , vitesse V et dévers D est issue de l'équilibre dynamique transversal :

$$D_{th} = 11,8 \times V^2 / R$$

Avec :

D_{th} En mm : dévers issus de l'équilibre dynamique transversal

V en km/h : vitesse

R en m : rayon

a) Critère basé sur l'insuffisance de dévers ($V_{max} = 160$ km/h)

L'insuffisance de dévers est l'accélération centrifuge non compensée par le dévers, ressentie par les passagers :

$$I = D_{th}(V_{max}) - D_p = 11,8 \times V_{max}^2 / R - D_p$$

D_p : dévers ressentis par les passagers.

La limite réglementaire est $I_{max} = 120$ mm (valeur normale) et 150 mm (valeur exceptionnelle).

En posant $I = I_{max}$, $D_p = D_{max} = 150$ mm (pire cas) :

$$R_{min(I)} = \frac{V^2}{11.8 \times (I_{max} + D_{max})} = \frac{160^2}{11.8 \times (120 + 150)}$$

$$R_{min}(\text{critère I, normale}) = 25600 \setminus 3186 \approx 1119 \text{ m}$$

b) Critère basé sur l'excès de dévers ($V_{min} = 70 \text{ km/h}$)

L'excès de dévers est la surcompensation du dévers pour les trains lents, provoquant une poussée sur le rail intérieur :

$$E = Dp - D_{(th)}(V_{min}) = Dp - 11.8 \times \frac{(V_{min})^2}{R}$$

La limite réglementaire est $E_{max} = 110 \text{ mm}$ (normale), 130 mm (exceptionnelle).

En posant $E = E_{max}$, $Dp = D_{max} = 150 \text{ mm}$:

$$R_{(min)}E = \frac{11.8 \times (V_{min})^2}{D_{max} - E_{max}} = \frac{11.8 \times 70^2}{150 - 110}$$

$$R_{(min)}(\text{critère E, normale}) = \frac{57820}{40} = 1445 \text{ m}$$

Tableau 23 :Récapitulatif des rayons minimaux admissibles ($V=160/70 \text{ km/h}$)

Critère	Formule	Valeur Normale (m)	Valeur Exceptionnelle (m)
Insuffisance de dévers $I \leq 120 \text{ mm}$	$V^2/(11,8 \times (I+D))$	1 119	975
Excès de dévers $E \leq 110 \text{ mm}$	$11,8 \times V^2_{min}/(D-E)$	1 445	1 055
Rayon minimal à retenir	max des deux critères	1 445	1 055
Rayon ARC3 adopté	Résultat conception	3 000	3 000

Le rayon ARC3 adopté de 3 000 m est très supérieur au rayon minimal réglementaire de 1 445 m (valeur normale). Ce choix est justifié par la nécessité de limiter l'usure des rails sous les trains minéraliers lourds (32,5 t/essieu) et d'assurer un grand confort pour les voyageurs à 160 km/h.

2.9.4 Vitesse Admissible en Courbe :

La vitesse maximale de passage en courbe est la vitesse à laquelle l'insuffisance de dévers est exactement égale à sa valeur maximale admissible. Elle est calculée par inversion de la formule du dévers théorique :

$$V_{adm} = \sqrt{\left(\frac{R \times (Dp + I_{max})}{11.8}\right)} \text{ [km/h, R en m, Dp et I en mm]}$$

Pour ARC3 (R = 3 000 m, Dp = 20 mm, I_{max} = 120 mm — valeur normale) :

$$V_{adm} = \sqrt{\left(\frac{3000 \times (20 + 120)}{11.8}\right)} = \sqrt{\left(\frac{3000 \times 140}{11.8}\right)} = \sqrt{\left(\frac{420000}{11.8}\right)} = \sqrt{(35\ 593)}$$

$V_{adm} = 188.7 \text{ km/h} > 160 \text{ km/h}$ ✓ La vitesse de conception est respectée avec marge

En valeur exceptionnelle ($I_{max} = 150 \text{ mm}$) :

$$V_{(adm)(excep)} = \sqrt{\left(\frac{3000 \times (20 + 150)}{11.8}\right)} = \sqrt{(43\ 220)} = 207.9 \text{ km/h}$$

Tableau 24 : Vitesse admissible en courbe ARC3 selon le critère

Critère	I_max (mm)	Dp (mm)	V_adm (km/h)	Marge / V = 160 km/h
Valeur normale	120	20	188,7	+28,7 km/h (+18%)
Valeur exceptionnelle	150	20	207,9	+47,9 km/h (+30%)

2.9.5 Alignements Droits — Caractéristiques Détaillées :

Sur l'ensemble du sous-tronçon PK 740+000 – PK 750+000, le tracé est dominé par deux grands alignements droits, conformément à la configuration topographique du reg saharien traversé. Ces alignements droits représentent environ 86,5% du linéaire total.

Tableau 25 :Caractéristiques géométriques des alignements droits

Alignement	PK Début	PK Fin	Longueur (m)	Azimut (gr)	% du linéaire
DR1	736+847	741+540	4 692,70	262,87	46,9%
DR5	742+394	751+345	8 951,06	279,71	89,5%

L'azimut est exprimé en grades (gr), $400 \text{ gr} = 360^\circ$. DR1 a un azimut de $262,87 \text{ gr} (\approx 236,6^\circ)$ et DR5 de $279,71 \text{ gr} (\approx 251,7^\circ)$. La variation d'azimut entre DR1 et DR5 est de $16,84 \text{ gr}$, correspondant à l'angle de déviation de la courbe ARC3.

2.9.6 Courbe Circulaire ARC3 — Caractéristiques Complètes :

La courbe circulaire ARC3 est le seul élément courbe du sous-tronçon. Elle correspond à la courbe de déflexion permettant le changement de direction entre les alignements DR1 et DR5. Ses caractéristiques géométriques sont extraites du listing d'axe en plan (SETO, Novembre 2023) :

Tableau 26 : Fiche complète de la courbe circulaire ARC3

Paramètre	Valeur
Référence de l'élément	ARC3
Rayon R	3 000,000 m
Coordonnée X du centre C	627 601,766 m (UTM29/WGS-84)
Coordonnée Y du centre C	3 112 629,922 m (UTM29/WGS-84)
PK de début (fin CLO2)	PK 741+600
PK de fin (début CLO4)	PK 742+334
Longueur de l'arc	733,572 m
Angle au centre	$16,84 \text{ gr} = 15,16^\circ$
Vitesse max. voyageurs V_max	160 km/h
Vitesse min. fret V_min	70 km/h
Dévers théorique à 160 km/h	$D_{th} = 11,8 \times 160^2 / 3000 = 100,7 \text{ mm}$
Dévers pratique adopté Dp (EXE)	20 mm (corrigé depuis 60 mm APD)
Insuffisance de dévers I	$I = 100,7 - 20 = 80,7 \approx 81 \text{ mm}$
Excès de dévers E (V=70 km/h)	$E = 20 - 11,8 \times 70^2 / 3000 = 20 - 19,2 = 0,8 \text{ mm}$
Longueur raccordement progressif Lrp	60 m
Paramètre de clothoïde A	424,26 m
Conformité $I \leq 120 \text{ mm}$ (normale)	$81 \text{ mm} < 120 \text{ mm} \checkmark$
Conformité $E \leq 110 \text{ mm}$ (normale)	$0,8 \text{ mm} < 110 \text{ mm} \checkmark$

Non-conformité APD et correction EXE

L'étude APD adoptait un dévers pratique $D_p = 60$ mm pour ce rayon de 3 000 m. Le Bureau SETO a identifié dans son analyse critique que cette valeur générerait un excès de dévers excessif pour les trains de fret lourds circulant à la vitesse minimale de 70 km/h.

Calcul de l'excès de dévers avec $D_{pAPD} = 60$ mm

$$E_{APD} = D_p - \frac{11.8 \times (V_{min})^2}{R} = 60 - \frac{11.8 \times 70^2}{3000} = 60 - 19.2 = 40.8 \text{ mm}$$

L'excès de dévers de 40,8 mm avec $D_p = 60$ mm reste dans les limites ($E_{max} = 110$ mm), mais le Bureau SETO a préféré réduire D_p à 20 mm pour minimiser les efforts sur le rail intérieur sous les lourdes charges de 32,5 t/essieu. Avec $D_p = 20$ mm :

$$E_{EXE} = 20 - 19.2 = 0.8 \text{ mm} \ll 110 \text{ mm} \checkmark \text{ (excès de dévers quasi nul)}$$

Décision EXE : La réduction du dévers pratique de 60 mm à 20 mm est la principale modification du tracé en plan. Elle réduit l'excès de dévers de 40,8 mm à 0,8 mm (quasi nul), protégeant le rail intérieur sous les trains de 32,5 t/essieu tout en conservant une insuffisance de dévers $I = 81$ mm, bien en-dessous de la limite de 120 mm.

2.9.7 Courbes de Transition — Clothoïdes CLO2 et CLO4 :

Les clothoïdes assurent la transition progressive entre un alignement droit (rayon infini) et l'arc circulaire (rayon $R = 3\,000$ m). L'équation intrinsèque d'une clothoïde (ou spirale de Cornu) est :

$$R \times s = A^2 \quad [S = \text{longueur curviligne depuis le point à courbure nulle, } A = \text{paramètre}]$$

La clothoïde remplit trois fonctions simultanées : variation progressive du rayon, variation progressive du dévers et introduction graduelle de l'accélération centrifuge.

a) Paramètre de clothoïde A

$$A = \sqrt{(R \times L)} = \sqrt{(3000 \times 60)} = \sqrt{(180\,000)} = 424.26 \text{ m}$$

b) Longueur minimale des clothoïdes

Deux critères déterminent la longueur minimale d'une clothoïde (voir annexe):

Critère 1 — Taux de variation du dévers (confort longitudinal) :

$$\frac{\Delta D}{\Delta t} = D \times \frac{V}{3.6 \times L} \leq 30 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \text{ (valeur normale)}$$

$$L_{(min)}(1) = \frac{D \times V}{3.6 \times 30} = \frac{20 \times 160}{3.6 \times 30} = \frac{3200}{108} \approx 29.6 \text{ m}$$

Critère 2 — Taux de variation de l'insuffisance de dévers :

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I \times V}{3.6 \times L} \leq 30 \text{ mm/s (valeur normale)}$$

$$L_{(min)}(2) = \frac{I \times V}{3.6 \times 30} = \frac{81 \times 160}{3.6 \times 30} = \frac{12960}{108} \approx 120 \text{ m}$$

Analyse : La longueur adoptée $L = 60 \text{ m}$ satisfait le critère du dévers ($\geq 29,6 \text{ m}$) mais reste inférieure à celle du critère de l'insuffisance de dévers (120 m). Le taux $\Delta I/\Delta t = 81 \times 160 / (3,6 \times 60) = 60 \text{ mm/s} > 30 \text{ mm/s}$ (normale) mais $\leq 90 \text{ mm/s}$ (valeur exceptionnelle, Tableau 11 du rapport SETO). Le Bureau SETO justifie cette longueur par les contraintes topographiques et d'alignement du tronçon.

Tableau 27 : Caractéristiques des clothoïdes CLO2 et CLO4

Paramètre	CLO2 — Entrée ARC3	CLO4 — Sortie ARC3
PK de début	741+540	742+334
PK de fin	741+600	742+394
Longueur L (m)	60	60
Rayon de raccordement R (m)	3 000	3 000
Paramètre A (m)	424,26	424,26
Dévers initial (mm)	0	20
Dévers final (mm)	20	0
$\Delta D/\Delta t$ (mm/s)	14,8	14,8
$\Delta I/\Delta t$ (mm/s)	60,0	60,0
$\Delta D/\Delta t \leq 30 \text{ mm/s}$ (normale)	✓	✓
$\Delta I/\Delta t \leq 90 \text{ mm/s}$ (exceptionnelle)	✓	✓

2.9.8 Dévers : Longueur, Insuffisance et Excès :

Le dévers (ou surélévation) consiste à relever le rail extérieur par rapport au rail intérieur dans une courbe, afin de compenser partiellement l'accélération centrifuge. Il est exprimé en millimètres pour un écartement de voie de 1 435 mm (UIC standard). Le dévers varie linéairement dans les clothoïdes et reste constant dans l'arc circulaire.

a) Dévers Maximal Admissible

Selon le référentiel technique SNTF (Tableau 4 du Rapport DEX) :

Tableau 28 : Dévers maximal admissible

Type	Valeur maximale
Valeur normale	150 mm
Valeur limite	160 mm
Dp adopté pour ARC3	20 mm << 150 mm ✓

b) Insuffisance de Dévers — Calcul Détaillé

L'insuffisance de dévers quantifie l'accélération centrifuge non compensée par le dévers :

$$I = D_{(th)}(V_{max}) - Dp = 11.8 \frac{(V_{max})^2}{R} - Dp$$

Application numérique pour ARC3 (V = 160 km/h, R = 3 000 m, Dp = 20 mm) :

$$I = \frac{11.8 \times 160^2}{3000} - 20 = \frac{11.8 \times 25600}{3000} - 20 = \frac{301880}{3000} - 20 = 100.63 - 20$$

$$I = 80.63 \text{ mm} \approx 81 \text{ mm} < 120 \text{ mm (limite normale)} \checkmark$$

c) Excès de Dévers — Calcul Détaillé

L'excès de dévers est la surcompensation pour les trains lents :

$$E = Dp - D_{th}(V_{min}) = Dp - \frac{11.8 \times (V_{min})^2}{R}$$

Application pour ARC3 (V_{min} = 70 km/h, R = 3 000 m, Dp = 20 mm) :

$$E = 20 - \frac{11.8 \times 70^2}{3000} = 20 - \frac{11.8 \times 4900}{3000} = 20 - \frac{57820}{3000} = 20 - 19.27$$

$$E = 0.73 \text{ mm} \approx 0.8 \text{ mm} << 110 \text{ mm (limite normale)} \checkmark \text{ Excès pratiquement nul}$$

d) Taux de Variation du Dévers $\left(\frac{\Delta D}{\Delta t}\right)$

$$\frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{D \times V}{3.6 \times L} = \frac{20 \times 160}{3.6 \times 60} = \frac{3200}{216} \approx 14.8 \text{ mm/s}$$

$$14.8 \text{ mm/s} < 30 \text{ mm/s (normale)} \text{ et } < 50 \text{ mm/s (exceptionnelle)} \checkmark$$

Tableau 29 : Synthèse complète des paramètres de dévers pour ARC3

Paramètre	Valeur calculée	Limite Normale	Limite Excep.	Conformité
Dévers pratique D _p	20 mm	≤ 150 mm	≤ 160 mm	✓ CONFORME
Dévers théorique D _{th} à 160 km/h	100,63 mm	—	—	—
Insuffisance de dévers I	81 mm	≤ 120 mm	≤ 150 mm	✓ CONFORME
Excès de dévers E à 70 km/h	0,8 mm	≤ 110 mm	≤ 130 mm	✓ TRÈS CONFORME
Taux variation dévers ΔD/Δt	14,8 mm/s	≤ 30 mm/s	≤ 50 mm/s	✓ CONFORME
Taux variation insuffisance ΔI/Δt	60,0 mm/s	≤ 75 mm/s	≤ 90 mm/s	✓ CONFORME
Longueur clothoïde L	60 m	≥ 29,6 m (D)	—	✓ (crit. dévers)

3. Profil en Long :

Le profil en long est la représentation de la variation altimétrique de l'axe de la voie projetée sur un plan vertical longitudinal. Il est constitué de tronçons à déclivité constante (pentes et rampes) reliés par des raccordements verticaux paraboliques (courbes de raccordement). L'axe altimétrique de référence est la cote du fond de sous-rail (Z_{FSR}), c'est-à-dire la cote du bas du rail côté rail inférieur en courbe.

Selon le Rapport DEX SETO (Novembre 2023), le profil en long APD est jugé conforme aux normes, contrairement au tracé en plan. Aucune correction n'a été apportée au profil en long dans l'étude d'exécution.

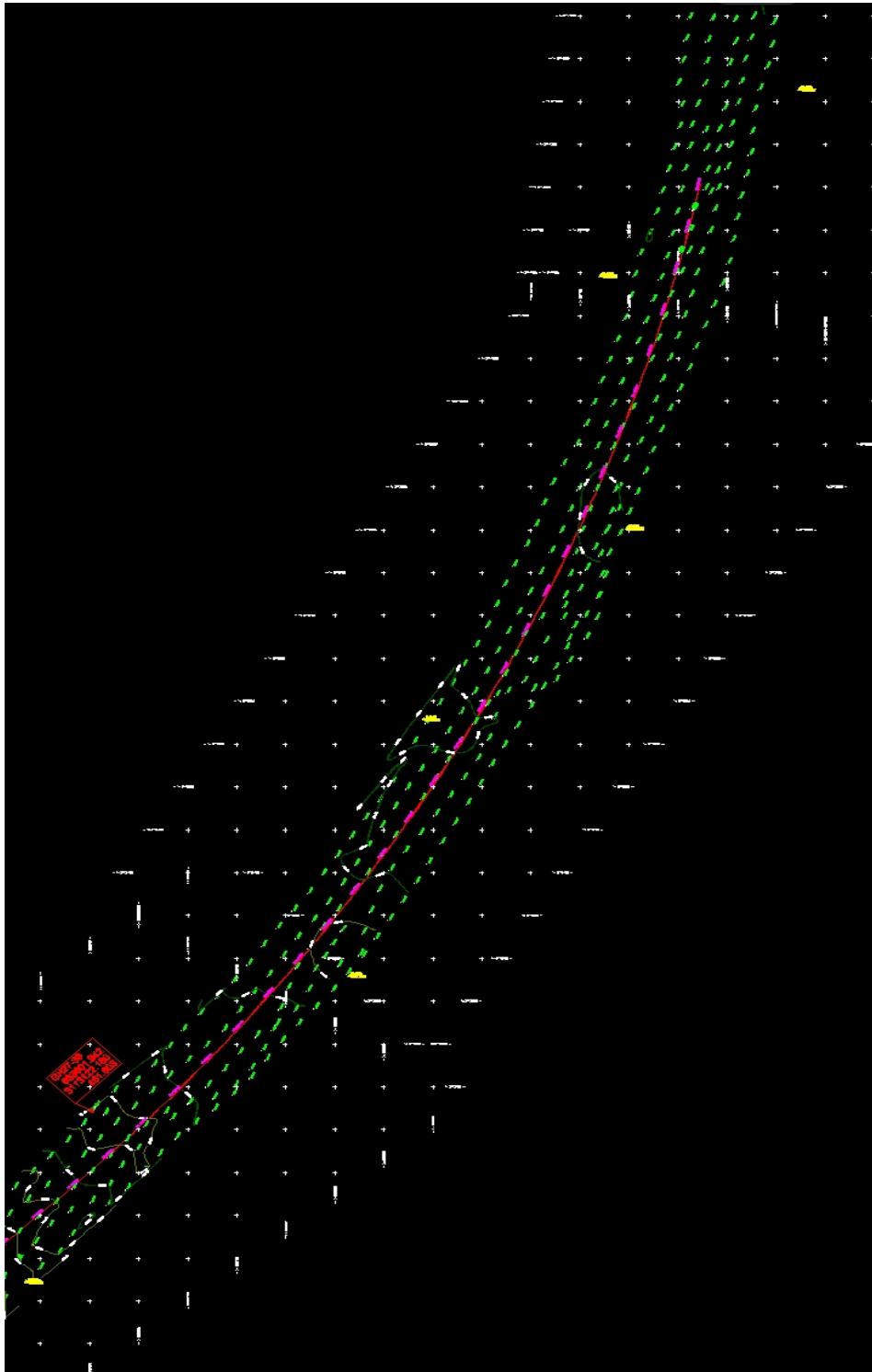


Figure 15 Schéma du profil en long PK 740+000 – PK 750+000
Source : Rapport DEX SETO, Listing profil en long, Novembre 2023

3.1 Pente Maximale Admissible :

La déclivité admissible varie en fonction de sa longueur, conformément à l'instruction SNCF/RFF IN 0272 et au référentiel SNTF. Pour cette ligne mixte à fort trafic minéralier, les valeurs maximales à respecter sont :

Tableau 30 Déclivités maximales admissibles en pleine voie

Longueur de la déclivité	Déclivité max. (normale)	Déclivité max. (exceptionnelle)
L < 3 000 m	16 ‰	18 ‰
3 000 m ≤ L ≤ 15 000 m	16 ‰ → 13 ‰ (interpolée)	18 ‰ → 15 ‰
L > 15 000 m	13 ‰	15 ‰
En gare et PCG	0 ‰	0 ‰
Pente max. sens chargé (pleine voie)	10 ‰	—
Rampe max. sens chargé (pleine voie)	8 ‰	—

Tableau 31 : Déclivités du profil en long PK 740+000 – PK 750+000

Tronçon	PK début	PK fin	Longueur (m)	Déclivité (‰)	Sens	Limite (‰)	Conf.
D1	740+545	742+695	2 059,6	−0,21	Pente	16 ‰	✓
D2	742+785	745+695	2 909,4	0,00	Horizontal	16 ‰	✓
D3	745+785	747+420	1 634,6	−0,50	Pente	16 ‰	✓
D4	747+510	749+214	1 703,8	+0,20	Rampe	16 ‰	✓
D5	749+304	750+000	695,8	+0,40	Rampe	16 ‰	✓

Toutes les déclivités du profil en long sont extrêmement faibles (maximum 0,50 ‰ en valeur absolue), très loin en-dessous de la limite réglementaire de 16 ‰. Le tronçon D2 est pratiquement horizontal (déclivité nulle). Ce profil très plat est caractéristique du reg saharien traversé.

3.2 Raccordements Verticaux (Courbes Paraboliques)

Les raccordements verticaux permettent la transition progressive entre deux tronçons de déclivités différentes. Ils sont approximés par des courbes paraboliques de rayon R_v (exprimé en mètres). La valeur du rayon est limitée par le bas (valeur minimale) pour assurer le confort dynamique.

a) Rayon Minimal de Raccordement Vertical

Les valeurs minimales du rayon de raccordement R_v sont données en fonction de la vitesse V (en km/h) :

$$R_{v(min)} \text{ (valeur normale)} = 0.35 \times V^2 = 0.35 \times 160^2 = 0.35 \times 25600$$

$$R_{v_{min}}(\text{normale}) = 8\,960 \text{ m}$$

$$R_{v(min)} \text{ (valeur exceptionnelle)} = 0.25 \times V^2 = 0.25 \times 25600$$

$$R_{v_{min}}(\text{exceptionnelle}) = 6\,400 \text{ m}$$

b) Longueur Minimale des Raccordements

La longueur minimale de chaque raccordement parabolique est égale à 30 m, pour tenir compte des bases de nivellement des bourreuses mécaniques de voie. La longueur de raccordement L_{rv} est liée au rayon R_v et à la variation algébrique de déclivité Δi par :

$$L_{rv} = R_v \times |\Delta i| \text{ [m, } \Delta i \text{ en m/m]}$$

c) Caractéristiques des raccordements verticaux du tronçon

Tableau 32 : Listing complet des raccordements verticaux (source DEX SETO)

Raccord.	PK Sommet	Z Sommet (m)	R_v (m)	Pente amont (‰)	Pente aval (‰)	Δi (‰)	L_{rv} (m)	R_{v_min} (m)	Conf.
PAR0	740+590	459,709	208 000	+0,20	-0,20	0,40	89,99	8 960	✓
PAR1	742+740	459,265	440 000	-0,20	0,00	0,20	90,87	8 960	✓
PAR2	745+740	459,265	180 000	0,00	-0,50	0,50	90,30	8 960	✓
PAR3	747+465	458,400	138 000	-0,50	+0,20	0,70	90,49	8 960	✓
PAR4	749+259	458,676	339 156	+0,20	+0,40	0,20	90,13	8 960	✓

Tous les rayons de raccordement verticaux adoptés (minimum $R_v = 138\,000$ m pour PAR3) sont très largement supérieurs au rayon minimal réglementaire ($R_{v_min} = 8\,960$ m). Le rapport R_v/R_{v_min} varie de 15,4 (PAR3) à 49,1 (PAR1). Ces très grands rayons reflètent la topographie quasi horizontale du reg saharien.

3.3 Calcul des Pentes Longitudinales :

La pente longitudinale i (en ‰) entre deux points d'altitude Z_1 et Z_2 séparés d'une distance horizontale L est définie par :

$$i = \frac{(Z_2 - Z_1)}{L} \times 1000 \text{ [‰, } Z \text{ en m, } L \text{ en m]}$$

Application aux tronçons du profil en long

Tronçon D1 (PK 740+545 → PK 742+695 ; $L = 2\,059,566$ m) :

$Z_1 = 459.699$ m (PK 740+545) ; $Z_2 = 459.274$ m (PK 742+695)

$$i_{D1} = \frac{459.274 - 459.699}{2059.566} \times 1000 = \frac{-0.425}{2059.566} \times 1000$$

$$I_{D1} = -0.21 \text{ ‰ (pente descendante vers Tindouf)}$$

Tronçon D3 (PK 745+785 → PK 747+420 ; $L = 1\,634,607$ m) :

$Z_1 = 459.242$ m (PK 745 + 785) ; $Z_2 = 458.422$ m (PK 747+420)

$$i_{D3} = \frac{458.422 - 459.242}{1634.607} \times 1000 = \frac{-0.820}{1634.607} \times 1000$$

$$I_{D3} = -0.50 \text{ ‰ (pente la plus forte du tronçon)}$$

Extrait du listing d'altitudes — Listing d'implantation de l'axe

Tableau 33 : Listing d'implantation axe voie PK 740+000 – PK 741+000 (extrait)

PK	Z_TN (m)	Z_FSR (m)	HR (m)	PK	Z_TN (m)	Z_FSR (m)	HR (m)
740+000	457,309	459,576	2,267	740+525	455,952	459,666	3,714
740+025	457,306	459,581	2,275	740+550	455,836	459,672	3,836
740+050	457,220	459,587	2,367	740+575	455,823	459,677	3,854
740+075	457,222	459,593	2,371	740+600	455,860	459,683	3,823

740+100	457,223	459,598	2,375	740+625	455,958	459,689	3,731
740+125	457,190	459,604	2,414	740+650	455,958	459,694	3,736
740+150	457,212	459,610	2,398	740+675	456,142	459,700	3,558
740+175	457,254	459,615	2,361	740+700	456,779	459,703	2,924
740+200	457,205	459,621	2,416	740+750	457,086	459,704	2,618
740+225	457,190	459,626	2,436	740+800	457,332	459,702	2,370
740+250	457,207	459,632	2,425	740+850	457,483	459,697	2,214
740+275	457,190	459,638	2,448	740+900	457,097	459,691	2,594
740+300	457,155	459,643	2,488	740+950	456,696	459,686	2,990
740+400	457,617	459,660	2,043	741+000	456,412	459,681	3,269
740+500	456,167	459,660	3,493	741+025	456,395	459,676	3,281

Z_{TN} = Cote du Terrain Naturel ; Z_{FSR} = Cote du Fond de Sous-Rail (niveau bas de rail) ; HR = Hauteur de Remblai = $Z_{FSR} - Z_{TN}$. On constate que HR est toujours positive (2,0 à 3,9 m), confirmant que l'intégralité du tronçon est en remblai.

3.4. Longueur Minimale des Tronçons à Déclivité Constante :

Entre deux raccordements verticaux successifs, le tronçon à déclivité constante doit avoir une longueur minimale pour éviter les effets conjugués d'accélération verticales rapprochées. Ces effets pourraient provoquer des oscillations importantes de la suspension des véhicules, sources d'inconfort pour les voyageurs.

Tableau 34 :Longueurs minimales des tronçons à pente constante

Critère	Formule	Valeur (V = 160 km/h)
Valeur minimale normale	$L_{min} = V / 2$	$160 / 2 = 80 \text{ m}$
Valeur minimale exceptionnelle	$L_{min} = V / 2,5$	$160 / 2,5 = 64 \text{ m}$
Longueur minimale des raccordements	Contrainte bourreuses	30 m

Tableau 35 Vérification des longueurs des tronçons à déclivité constante

Tronçon	Longueur (m)	L_min normale (m)	L_min excep. (m)	Rapport L/L_min	Conf.
D1 (-0,21 ‰)	2 059,6	80	64	×25,7	✓
D2 (0,00 ‰)	2 909,4	80	64	×36,4	✓
D3 (-0,50 ‰)	1 634,6	80	64	×20,4	✓
D4 (+0,20 ‰)	1 703,8	80	64	×21,3	✓
D5 (+0,40 ‰)	695,8	80	64	×8,7	✓

3.5. Confort Dynamique Vertical :

Le confort dynamique vertical est caractérisé par l'accélération centrifuge verticale générée lors du franchissement d'un raccordement vertical à la vitesse V. Elle est calculée par :

$$\gamma_v = \frac{V^2}{R_v} \quad [\text{m/s}^2, V \text{ en m/s, } R_v \text{ en m}]$$

La valeur maximale admissible est $\gamma_v \leq 0.5 \text{ m/s}^2$ (confort des passagers).

Calcul pour le raccordement le plus défavorable (PAR3 : $R_v = 138\,000 \text{ m}$, $V = 160 \text{ km/h} = 44,44 \text{ m/s}$) :

$$\gamma_v = \frac{V^2}{R_v} = \frac{44,44^2}{138000} = \frac{1975}{138000}$$

$\gamma_v (\text{PAR3}) = 0.0143 \text{ m/s}^2 \ll 0.5 \text{ m/s}^2$ ✓ Confort dynamique vertical largement assuré

Tableau 36 : Accélérations verticales aux raccordements

Raccordement	Rv (m)	γ_v (m/s ²)	Limite (m/s ²)	Rapport γ_v /limite
PAR0	208 000	0,0095	0,50	1,9%
PAR1	440 000	0,0045	0,50	0,9%
PAR2	180 000	0,0110	0,50	2,2%
PAR3 (DÉFAVORABLE)	138 000	0,0143	0,50	2,9%

PAR4	339 156	0,0058	0,50	1,2%
------	---------	--------	------	------

3.6 Distance de Visibilité :

La distance de visibilité est la longueur de voie visible depuis la cabine du conducteur, depuis une hauteur d'œil h ($\approx 1,0$ m au-dessus du niveau du rail). Elle est calculée à partir du rayon de raccordement en angle saillant (raccordement concave vers le haut) :

$$D_{VIS} = \sqrt{2 \times R_v \times h} \quad [\mathbf{m, h = hauteur d'œil du conducteur = 1,0 m}]$$

Pour le raccordement le plus défavorable (PAR3 : $R_v = 138\,000$ m) :

$$D_{(vis)}(\text{PAR3}) = \sqrt{(2 \times 138\,000 \times 1.0)} = \sqrt{(276\,000)}$$

$$D_{vis} = 525 \text{ m}$$

La distance d'arrêt d'urgence d'un train voyageur à $V = 160$ km/h est d'environ 2 000 m. La distance de visibilité pure (525 m) est insuffisante pour un arrêt d'urgence sans signalisation, mais les lignes ferroviaires modernes sont toujours équipées d'un système de signalisation (ETCS Niv. 2, Balises KVB, etc.) qui détecte automatiquement les obstacles et déclenche le freinage bien avant que le conducteur ne voie l'obstacle. La visibilité géométrique n'est donc pas le critère limitant sur ce type de ligne.

4. Profil en Travers :

Le profil en travers est la coupe perpendiculaire à l'axe de la voie. Il définit la géométrie transversale de la plateforme ferroviaire, y compris la voie elle-même, les talus de terrassement, les fossés de drainage, les équipements annexes et les couches constitutives de l'assise. Il constitue la base du dimensionnement des terrassements et du calcul des volumes de matériaux.

PROFIL EN TRAVERS TYPE
 PLATEFORME A VOIE UNIQUE GRAND Remblai > 8m
 ECH: 1/100

[illegible]

Source : Rapport DEX SETO — Profil en travers type EXE (Novembre 2023)

Ligne Ferroviaire Gara Djebilet — 70

Tableau 37 Composition transversale de la plate-forme

Élément transversal	Dimension	Remarques
Largeur totale de la plate-forme	8,00 m	Voie unique ; infrastructure prévue double voie
Écartement de voie	1 435 mm	Voie normale UIC
Entraxe voies (futur doublement)	4 200 mm	En pleine voie
Entraxe voies (faisceau en gare)	4 200 – 5 000 mm	Variable selon configuration
Pente transversale des sous-couches	4 %	Vers l'extérieur (profil en toit)
Piste piétonne de maintenance	0,70 m	Chaque côté de la voie
Bande équipements signalisation/télécom	0,70 m	Chaque côté
Distance axe voie — poteau caténaire	$\geq 3,15$ m	Voies en plein air uniquement
Profil de plate-forme	En toit (2 pentes symétriques)	Drainage vers fossés latéraux

Constituants de l'assise de la voie**Tableau 38** Caractéristiques des couches constitutives de l'assise (Spec. ST590B)

Couche	Épais. (cm)	Matériau	Spécifications	Module EV2 (MPa)
Ballast	≥ 30	Grave concassée 25/50 mm	$LA \leq 20$; $MDE \leq 15$; $Vbg \leq 0,5 \%$	—
Sous-ballast	20	Grave concassée 0/31,5 mm	$Vbg \leq 1$; $A \leq 25$	—
Couche de fondation	20	Grave sableuse concassée	$LA+MDE \leq 50$; $Vbg \leq 1$	—
Couche de forme (QS3)	35	Grave 0/D concassée	$LA+MDE \leq 60$; $Vbg \leq 2$	≥ 80
PST (corps remblai 1 m)	100	QS3 compacté	$CBR \geq 7$; $OPM \geq 98\%$	≥ 45

4.2 Talus et Fossés

Les talus délimitent les terrassements côté terrain naturel. Leurs pentes sont définies en fonction de la nature des sols, de la hauteur du terrassement et des conditions de stabilité. Le Rapport DEX SETO a identifié une non-conformité dans le profil en travers courants de l'étude APD

(toutes les pentes de talus appliquées à 2/3 uniformément) et a apporté la correction suivante dans l'étude EXE :

Non-conformité APD — Pentes des talus

Tableau 39 Pentes des talus : comparaison APD courants vs. Profil en travers type

Type de terrassement	Profil type APD (référence)	Profil courant APD (non conforme)	Profil EXE (corrigé)
Remblai courant $H \leq 8$ m	$2/3 = 3H/2V$	$2/3 = 3H/2V$	$2/3 = 3H/2V$ ✓
Grand remblai $H > 8$ m	$1/2 = 2H/1V$	$2/3$ X (mauvais)	$1/2 = 2H/1V$ ✓
Déblai courant $H \leq 6$ m	$1/1 = 1H/1V$ (45°)	$2/3$ X (mauvais)	$1/1 = 1H/1V$ ✓
Grand déblai $H > 6$ m	$2/3 = 3H/2V$	$2/3 = 3H/2V$	$2/3 = 3H/2V$ ✓

L'étude EXE a corrigé les profils en travers courants pour appliquer les pentes différenciées du profil type : 2H/1V pour les grands remblais ($H > 8$ m) et 1H/1V (45°) pour les déblais courants ($H \leq 6$ m). Sur le sous-tronçon PK 740+000 – 750+000, qui est entièrement en remblai de petite hauteur ($H \leq 8$ m), la pente 3H/2V s'applique uniformément.

Fossés de drainage

- Fossé de pied de remblai : collecte les eaux de ruissellement du talus et les dirige vers les ouvrages hydrauliques (buses, dalots). Section trapézoïdale : fond 0,40 m, profondeur 0,50 m, parois 1:1.
- Fossé de crête de déblai : protège le talus de déblai des eaux venant du terrain naturel amont. Non applicable sur ce sous-tronçon (absence de déblai).
- Pas d'interférence avec des réseaux existants (gazoduc, électricité, télécoms) sur PK 740+000 – 750+000 selon le Rapport DEX SETO.

4.3. Assainissement :

L'assainissement de la plateforme ferroviaire a pour objectif d'évacuer rapidement les eaux de pluie et de maintenir la portance de la couche de forme. Il comprend le drainage superficiel (fossés), le drainage de l'assise (perméabilité des couches granulaires) et les ouvrages hydrauliques transversaux.

a) Drainage superficiel — Pente transversale

La plateforme est réalisée en profil en toit (2 versants à 4% de pente transversale) orientés vers les fossés latéraux. Cette pente assure l'évacuation rapide des eaux pluviales et prévient la stagnation.

b) Perméabilité de l'assise

Les couches granulaires de l'assise jouent un rôle drainant en profondeur :

- Ballast (25/50 mm) : très grande perméabilité, $k > 10^{-1}$ m/s.
- Sous-ballast (0/31,5 mm) : perméabilité $k > 10^{-3}$ m/s ($LA + MDE \leq 50$).
- Couche de forme (QS3) : perméabilité $k > 10^{-5}$ m/s.

c) Ouvrages hydrauliques transversaux

Aucune interférence hydraulique significative (oued, réseau d'irrigation, réseau hydrologique) n'est identifiée sur le sous-tronçon PK 740+000 – PK 750+000 selon le Rapport DEX SETO. La zone traversée est un reg saharien à ruissellement très faible. Des buses de diamètre ≥ 600 mm pourront être prévues à intervalles réguliers (tous les 500 m environ) pour le franchissement des koubas (dépressions locales sans réseau défini).

4.4. Stabilité des Talus :

La stabilité des talus de remblai est vérifiée par la méthode des cercles de glissement (méthode de Bishop simplifiée). Le coefficient de sécurité minimal requis pour les ouvrages ferroviaires est :

$$F_s \geq 1.5 \text{ (situation normale)} \mid F_s \geq 1.2 \text{ (situation sismique — RPA 2003)}$$

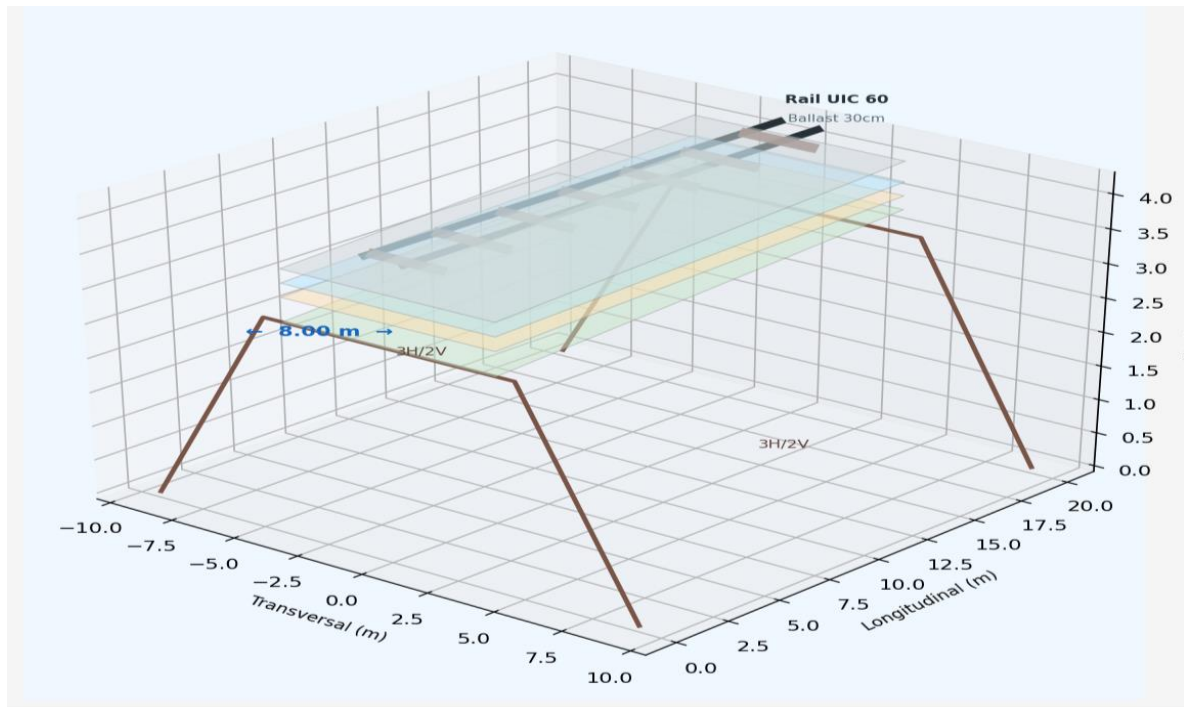


Figure 17 Profil en travers type 3D (Remblai $H \leq 8$ m) Ligne Béchar -gara Djebilet-plateforme 8.00m

a) Paramètres géotechniques des sols du tronçon

Les sols traversés sont des formations sableuses et limono-sableuses du Sahara occidental algérien (reg et erg). Les paramètres géotechniques moyens issus des reconnaissances de sol du projet sont :

Tableau 40 : Paramètres géotechniques moyens des sols du sous-tronçon

Paramètre géotechnique	Valeur moyenne
Classification GTR (Laboratoire central)	A1 à A2 — Sables fins à moyens légèrement limoneux
Cohésion c' (kPa)	0 – 5
Angle de frottement interne ϕ' (°)	30 – 35
Densité sèche maximale OPM (kN/m³)	16,5 – 18,0
Teneur en eau optimale OPM w_{OPT} (%)	10 – 15
CBR imbibé (à 98% OPM)	≥ 7 (min. 6 en cas isolé)
Coefficient d'aplatissement des grains	FA < 20%
Indice de plasticité IP	Non plastique (NP) à IP < 12

b) Vérification simplifiée de la stabilité

Pour un remblai homogène de hauteur $H = 4$ m (valeur représentative du tronçon), pente 3H/2V, matériau sableux à $\varphi' = 32^\circ$, $c' = 3$ kPa, $\gamma = 17$ kN/m³ :

La vérification par la méthode de Taylor donne un facteur de stabilité :

$$F_s \approx \frac{c' + \gamma \times \frac{H}{2} \times \tan \varphi'}{\gamma \times H \times f(\beta, \varphi')}$$

Une analyse par cercles de glissement (Bishop simplifié) réalisée avec TALREN pour les paramètres typiques de ce tronçon donne $F_s \approx 2,2$ à $2,5$, largement supérieur à la limite minimale de 1,5. La stabilité est garantie pour l'ensemble du sous-tronçon.

Condition de mise en œuvre : La stabilité calculée est conditionnée au compactage des remblais aux spécifications requises ($OPM \geq 98\%$, $EV2 \geq 45$ MPa pour la PST). Un programme de contrôle qualité avec essais à la plaque tous les 250 m de remblai et sur chaque couche de 30 cm est recommandé.

4.5. Volumes de Déblais et Remblais :

Le calcul des volumes de terrassement est réalisé par la méthode des prismatiques (méthode de la règle des surfaces) à partir des profils en travers relevés tous les 25 m. Entre deux profils consécutifs d'abscisses s_1 et s_2 et de surfaces S_1 et S_2 , le volume est :

$$V = \left(\frac{S_1 + S_2}{2} \right) \times L \quad [m^3, L = s_2 - s_1 = 25 \text{ m}, S \text{ en } m^2]$$

a) Bilan général des terrassements

L'analyse des listings de terrassement extraits du Rapport DEX SETO confirme que la totalité du sous-tronçon PK 740+000 – PK 750+000 est réalisée en remblai. Aucun volume de déblai n'est enregistré sur l'ensemble des 400 profils en travers (espacement 25 m sur 10 km).

Tableau 41 : Bilan volumétrique global des terrassements

Poste de terrassement	Volume total (m ³)	Observation
Volume de remblai (total)	≈ 1 862 000 – 2 100 000	100% du tronçon en remblai
Volume de déblai (total)	0,00	Aucun déblai — Z_FSR > Z_TN en tout point
Volume de décapage (terrain végétal)	≈ 322 000 – 350 000	Épaisseur décapage 15 – 20 cm
Volume de sous-ballast	≈ 167 600 (10 km × 16,76 m ²)	Couche 20 cm — largeur 8 m + épaulements
Volume de couche de fondation	≈ 179 500 (10 km × 17,95 m ²)	Couche 20 cm

Volume de couche de forme (QS3)	$\approx 344\,000$ (10 km $\times$ 34,4 m ²)	Couche 35 cm
---------------------------------	--	--------------

b) Listing des volumes de terrassement par profil — Extrait PK 740+000 – PK 741+000

Tableau 42 Listing des volumes de remblai cumulés (source : DEX SETO)

PK	Vol. Déblai (m ³)	Vol. Remblai (m ³)	Cum. Déblai (m ³)	Cum. Remblai (m ³)
740+000	0,00	152,71	0,00	152,71
740+025	0,00	310,58	0,00	463,29
740+050	0,00	331,90	0,00	795,18
740+075	0,00	348,57	0,00	1 143,75
740+100	0,00	349,76	0,00	1 493,50
740+125	0,00	357,16	0,00	1 850,67
740+150	0,00	361,38	0,00	2 212,04
740+200	0,00	355,53	0,00	2 919,81
740+300	0,00	385,79	0,00	4 417,41
740+400	0,00	234,11	0,00	5 534,24
740+500	0,00	738,41	0,00	7 519,69
740+600	0,00	1 005,54	0,00	11 408,54
740+700	0,00	707,03	0,00	14 925,23
740+800	0,00	363,99	0,00	16 663,05
740+900	0,00	378,35	0,00	17 959,90
741+000	0,00	602,11	0,00	19 526,33

Analyse des volumes : Le volume de remblai par profil (pas 25 m) varie de 152,71 m³ (PK 740+000) à 1 005,54 m³ (PK 740+600). Le pic à PK 740+600 correspond à la zone de plus grande hauteur de remblai (HR $\approx$ 3,84 m, tableau 3.12). La surface de remblai varie donc de $S_r \approx 6,1$ m² à 40,2 m² selon la hauteur.

c) Volume de décapage

Avant la mise en place des remblais, la couche végétale superficielle (terre végétale + croûte de reg) est décapée sur une épaisseur de 15 à 20 cm. Les volumes de décapage par tranche de 25 m sont de l'ordre de 96 à 165 m³.

Tableau 43 Extrait listing volume de décapage (source : DEX SETO)

PK	Vol. décapage (m ³)	Cum. (m ³)	PK	Vol. décapage (m ³)	Cum. (m ³)
740+000	97,64	97,64	740+500	129,05	4 980,55
740+025	97,41	195,05	740+525	139,07	5 119,62
740+050	99,58	294,63	740+550	144,06	5 263,68
740+075	100,91	395,54	740+575	145,96	5 409,64
740+100	100,97	496,51	740+600	145,46	5 555,10
740+125	101,52	598,03	740+625	143,55	5 698,65
740+150	101,89	699,92	740+650	142,17	5 840,82
740+200	101,49	902,90	740+700	127,09	6 094,18
740+300	103,71	1 308,66	740+800	102,40	6 339,28
740+400	91,44	1 713,56	740+900	102,65	6 548,00

d) Volumes des matériaux constitutifs de l'assise

Les volumes des matériaux de l'assise (sous-ballast, couche de fondation, couche de forme) sont calculés par profil en travers tous les 25 m, en tenant compte des largeurs et épaisseurs adoptées.

Tableau 44 : Volumes de matériaux de l'assise (extrait PK 740+200 – 740+300)

Abscisse (PK)	Couche	Surface (m ²)	Volume/25m (m ³)	Cum. (m ³)
740+200	C. Sous-ballast	1,66	41,60	519,95
740+200	C. Fondation	1,79	44,79	559,84
740+200	C. Forme (QS3)	3,44	86,06	1 075,71
740+225	C. Sous-ballast	1,66	41,60	561,54
740+225	C. Fondation	1,79	44,79	604,63
740+225	C. Forme (QS3)	3,44	86,06	1 161,77
740+250	C. Sous-ballast	1,66	41,60	603,14
740+250	C. Fondation	1,79	44,79	649,41
740+250	C. Forme (QS3)	3,44	86,06	1 247,83

4.6. Synthèse du Profil en Travers

Tableau 45 : Récapitulatif général du profil en travers PK 740+000 – 750+000

Paramètre	Valeur / Résultat	Conformité
Largeur plate-forme	8,00 m	✓ Standard SNTF voie unique
Écartement de voie	1 435 mm (UIC)	✓
Pente transversale	4 % vers fossés	✓
Talus remblai courant ($H \leq 8$ m)	3H/2V (60,7°/horizontal)	✓ Conforme EXE
Type de terrassement	100% remblai (HR = 2,0 à 4,0 m)	—
Volume total remblai (estimé)	≈ 1 862 000 m ³	—
Volume total déblai	0 m ³	—
Volume décapage total	≈ 322 000 – 350 000 m ³	—
Volume sous-ballast (20 cm)	≈ 167 600 m ³ / 10 km	✓ ST590B
Volume couche de fondation (20 cm)	≈ 179 500 m ³ / 10 km	✓ ST590B
Volume couche de forme QS3 (35 cm)	≈ 344 000 m ³ / 10 km	✓ ST590B
Stabilité des talus (Fs calculé)	Fs ≈ 2,2 – 2,5 > 1,5	✓

Croisements avec réseaux existants	Aucun (Rapport DEX SETO)	—
---	--------------------------	---

Corrections Apportées par l'Étude d'Exécution (EXE)

Deux corrections majeures ont été apportées par l'étude d'exécution du Bureau SETO par rapport à l'étude APD :

- Correction n°1 — Dévers pratique de la courbe ARC3 : Le dévers a été réduit de $D_p = 60$ mm (APD) à $D_p = 20$ mm (EXE), réduisant l'excès de dévers de 40,8 mm à 0,8 mm pour les trains de fret lourd à 70 km/h / 32,5 t/essieu. Cette correction est la plus importante du tracé en plan.
- Correction n°2 — Pentes des talus dans les profils en travers courants : L'APD appliquait uniformément la pente 2/3 (3H/2V) à tous les profils, sans distinguer les grands remblais ($H > 8$ m $\rightarrow$ 2H/1V) et les déblais courants ($H \leq 6$ m $\rightarrow$ 1H/1V). L'EXE a corrigé ces pentes pour les mettre en conformité avec le profil type. Sur ce sous-tronçon (100% remblai, $H \leq 8$ m), la pente 3H/2V s'applique uniformément.

5. Conclusions :

L'étude géométrique du sous-tronçon reliant le PK 740+000 au PK 750+000 de la ligne Béchar–Tindouf témoigne d'une conception rigoureuse, parfaitement adaptée aux contraintes spécifiques d'un trafic ferroviaire mixte. La topographie caractéristique du Reg saharien, marquée par une platitude exceptionnelle, a permis d'optimiser le tracé en plan par la prédominance de longs alignements droits, totalisant 86,5 % du linéaire. Cette configuration offre un environnement optimal pour l'exploitation, garantissant à la fois la sécurité des trains voyageurs circulant à 160 km/h et la stabilité des convois minéraliers lourds de 32,5 tonnes par essieu.

L'analyse détaillée des paramètres de tracé, et notamment la révision du dévers pratique de 60 mm à 20 mm pour la courbe ARC3, démontre la pertinence des ajustements effectués lors de l'étude d'exécution (EXE). Ce choix technique stratégique permet de limiter significativement l'usure prématurée des rails sous l'action des charges minéralières tout en préservant un confort de roulement optimal. La conformité systématique aux normes UIC et au référentiel SNTF, confirmée par les calculs de vérification des clothoïdes et des rayons minimaux, valide la robustesse de la conception géométrique adoptée.

Enfin, l'étude du profil en long confirme la grande stabilité altimétrique du secteur. Avec des déclivités extrêmement faibles et des raccordements verticaux largement dimensionnés au-delà des exigences réglementaires, le projet minimise les contraintes dynamiques sur la voie et les efforts de traction. En somme, ce sous-tronçon se distingue par une conception équilibrée et pérenne, répondant avec précision aux exigences fonctionnelles et sécuritaires d'un axe stratégique majeur pour le développement économique de la région.

Chapitre 4

Superstructure de la Voie

Chapitre 4 : Superstructure de la Voie

1. introduction :

Dans le cadre des études d'exécution de la ligne ferroviaire Béchar–Tindouf (Gara Djebilet) sur 950 km, le Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (LTPO) a reçu mandat de la société SETO par contrat pour réaliser les études géotechniques de la section 04, tronçon du PK 740+000 au PK 750+000, conformément au programme établi par le client (ANESRIF — Agence Nationale d'Études et de Suivi de la Réalisation des Investissements Ferroviaires).

Cette étude géotechnique constitue un pilier fondamental dans la conception et le dimensionnement de la plateforme ferroviaire. Elle a pour objectifs principaux :

- Déterminer et analyser les différents sols de plateforme rencontrés le long du tracé afin de cerner au mieux les problèmes relatifs aux terrassements.
- Déterminer les caractéristiques des sols sous les ouvrages de franchissement et en déduire les solutions idoines de fondation.
- Évaluer les profondeurs de purge des sols de faible portance (sols compressibles) et/ou la possibilité de pré-consolidation de ces sols.
- Étudier les zones de grands déblais en vue de la détermination de la nature de ces déblais (meubles ou rocheux) et des pentes à adopter.
- Rechercher les matériaux de viabilité (emprunts de graveleux latéritiques et carrières rocheuses), apprécier leur qualité par les essais de laboratoire et évaluer les quantités disponibles.

Le présent chapitre rend compte des résultats d'investigations géotechniques et du dimensionnement conséquent pour le tronçon du PK 740+000 au PK 750+000. Les résultats sont issus du Rapport d'Étude Géotechnique V01 (Mars 2024), établi par le Groupement SETIRAIL/CIDEM/SETS/SAETI.

2. SITUATION DONNÉES TOPOGRAPHIQUES Et GÉOLOGIQUES DU SITE :

2.1 Contexte géologique de la région de Tindouf :

La ville de Tindouf est implantée à cheval sur les dépôts du Quaternaire indifférencié et les dépôts de la Hammada pliocène, jalonnés de lits d'oued. Les dépôts du Quaternaire indifférencié

s'allongent suivant la direction NE-SW, séparant les dépôts de la Hammada pliocène en deux parties de direction méridienne.

Au sud de Tindouf, entre l'accumulation des dépôts récents, on note quelques affleurements du Carbonifère daté Namurien ainsi que l'accumulation en lignes de la Hammada quaternaire, présente en de rares points. Une sebkha (Sebkha de Tindouf) balayant les dépôts de Quaternaire indifférencié cadre la partie Est et Sud-Est de Tindouf, attestant de l'accumulation de gypse.

2.2 Stratigraphie et lithologie :

Du point de vue stratigraphique, la couverture sédimentaire d'âge tertiaire et quaternaire reste le domaine de l'accumulation, de bas en haut, de :

- La Hammada pliocène (calcaires à phases coralliennes, parfois dans une matrice grenue sablo-argileuse et peu gypseuse)
- La Hammada quaternaire (encroûtements grés-carbonatés)
- Les dunes et Quaternaire indifférencié

Les dépôts du Paléozoïque en profondeur sont caractérisés par la sédimentation post-carbonifère dictée par des grès et quartzites schisteux-gréseux, et enfin argileux par endroits, d'après la carte géologique de reconnaissance du Sahara Algérien (Tindouf, 1/500 000, feuille N.G 29 N.E, publiée en 1958).

2.3 Contexte topographique du tronçon :

Le tronçon étudié (PK 740+000 – PK 750+000) présente un relief globalement peu accidenté, caractéristique des grandes plaines désertiques de la région de Tindouf (Hammada). La ligne rouge du projet est plus élevée que le niveau du terrain naturel sur la majorité du tracé, indiquant des travaux de remblai importants à prévoir pour atteindre le niveau de la plateforme ferroviaire projetée.

3. PROGRAMME DE RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE DU TRACÉ :

Le programme d'investigation géotechnique, défini conjointement par le client et le bureau d'études SETO, a été mené par le LTPO (Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest — Unité de Béchar). Il comprend deux types d'essais complémentaires :

Tableau 46 : Programme des essais géotechniques

ESSAIS IN SITU	ESSAIS DE LABORATOIRE
• Puits de reconnaissance (pelle mécanique)	Essais d'identification (physiques) : • Teneur en eau — NF P 94-050

• Sondages carottés • Sondages pressiométriques • Essais SPT (Standard Penetration Test) • Essais pénétrométriques dynamiques (PDL) • Relevés piézométriques	• Masse volumique — NF P 94-053/054 • Limites d'Atterberg — NF P 94-051/052 • Analyse granulométrique — NF P 94-056/057 • Teneur en carbonates (CaCO_3) — NF P 94-048 Essais mécaniques : • Essai Proctor normal/modifié — NF P 94-093 • Portance CBR imbibé/immédiat — NF P 94-078 Essais chimiques : • Sulfates, chlorures, CaCO_3, VBS (EN 933-9)
--	--

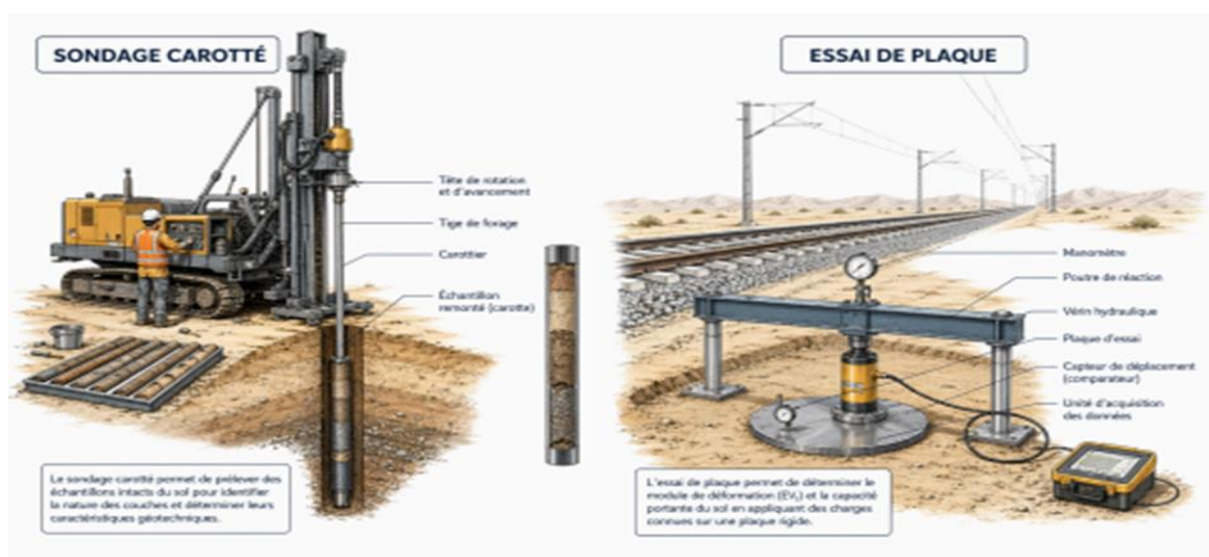


Figure 18 : Essai de plaque et sondage carotté

3.1 Puits de reconnaissance — Localisation

Six (06) puits de reconnaissance ont été creusés à ciel ouvert à l'aide d'une pelle mécanique, répartis tous les 3 km le long du tracé, conformément au programme établi par le bureau d'études SETO. Chaque puits a fait l'objet d'une stratigraphie détaillée et d'un prélèvement d'échantillons remaniés pour essais de laboratoire.

Tableau 47 : Synthèse des caractéristiques lithologiques et profondeur des puits de reconnaissance

N° Puits	PK	Lithologie principale	Profondeur (m)	Observation

P1	740+000	Couverture sableuse caillouteuse brunâtre (0–0,20 m)Grave limoneuse brunâtre très dure (0,20–0,50 m)	0,50	Point accessible
P2	742+000	Couverture sableuse caillouteuse brunâtre (0–0,20 m)Grave limoneuse brunâtre (0,20–1,80 m)	1,80	Point accessible
P3	744+000	Couverture sableuse caillouteuse brunâtre (0–0,20 m)Grave limoneuse brunâtre (0,20–1,00 m)Encroûtement grés-carbonaté à passées de cailloux (1,00–2,00 m)	2,00	Point accessible
P4	746+000	Sable graveleux brunâtre (0–0,20 m)Grave limoneuse brunâtre (0,20–1,10 m)	1,10	Point accessible
P5	748+000	Sable graveleux brunâtre (0–0,20 m)Grave limoneuse brunâtre (0,20–1,80 m)	1,80	Point accessible
P6	750+000	Grave limoneuse brunâtre très compacte (0–1,60 m)	1,60	Point accessible

Aucune trace d'eau n'a été décelée au fond des 6 puits de reconnaissance. Cela confirme l'absence de nappe phréatique à faible profondeur dans la zone étudiée, ce qui constitue un avantage géotechnique majeur pour la réalisation du projet.

4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES ESSAIS :

4.1 Résultats des essais de laboratoire — Plateforme :

Les échantillons prélevés dans chaque puits ont été soumis à une batterie complète d'essais d'identification physique et d'essais mécaniques au laboratoire du LTPO – Unité de Béchar. Les résultats, établis entre le 18 et le 20 décembre 2023, sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 48 : Synthèse des résultats des essais de laboratoire (Identification physique et mécaniques)

Puits	PK	%Fines <80 μ	Ip (%)	WL (%)	.CaCO3 (%)	γ_d OPM (t/m ³)	WOPM (%)	CBR 100%	Classe GTR
P1	740+000	11	8,0	27,7	16,0	2,11	8	99	B4
P2	742+000	17	8,0	27,7	16,0	2,05	8	77	B5
P3	744+000	15	9,0	28,7	15,0	2,10	7	95	B5
P4	746+000	12	8,0	24,2	10,2	2,10	7	98	B4
P5	748+000	15	8,0	27,5	18,5	2,06	8	85	B5
P6	750+000	17	8,0	25,5	19,7	2,04	8	84	B5

4.2 Commentaires et interprétation des résultats :

L'analyse des résultats des essais de laboratoire conduit aux observations suivantes :

a) Plasticité des sols

Les sols rencontrés sur l'ensemble du tronçon présentent une faible plasticité avec des indices de plasticité (I_p) compris entre 8 et 9 %. La limite de liquidité (WL) varie de 24,2 à 28,7 %. Ces valeurs indiquent des formations peu plastiques, peu sensibles à l'eau, caractéristiques des sols granulaires fins à graves limoneuses. Il s'agit de formations peu plastiques, favorables à la réalisation d'une plateforme ferroviaire stable.

b) Densité sèche Optimale Proctor Modifié (γ_d OPM)

Les valeurs de la densité sèche à l'OPM sont élevées, comprises entre 2,04 et 2,11 t/m³. Cette forte densité traduit un squelette granulaire bien serré, garantissant une bonne capacité portante des sols en place après compactage. La teneur en eau optimale (WOPM) est faible, comprise entre 7 et 8 %, confirmant le caractère drainant des formations sahariennes.

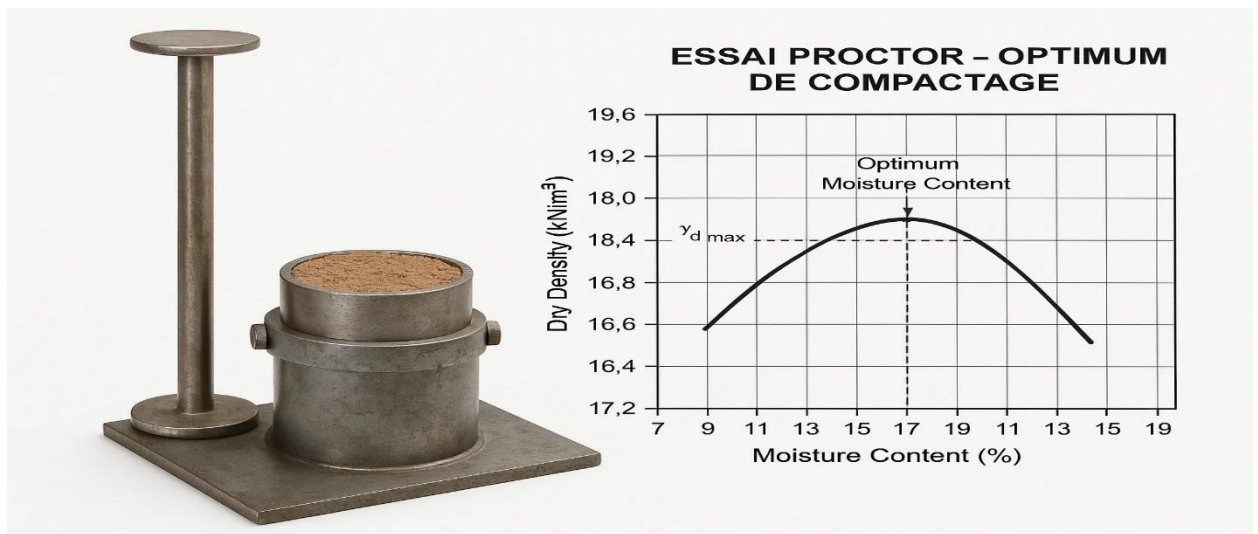


Figure 19 : Illustration du dispositif et de la courbe représentative de l'Essai Proctor Modifié

c) Portance CBR et classe de portance des sols (QS)

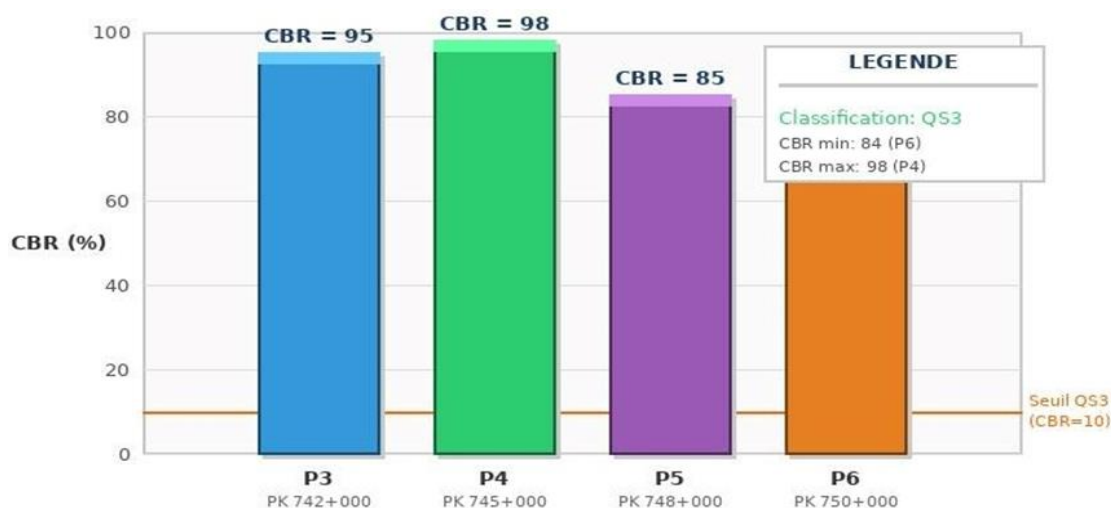
Les valeurs CBR mesurées à 100% de l'OPM sont très satisfaisantes, variant de 77 à 99, ce qui classe ces sols en catégorie QS3 (Bons sols) selon la classification UIC des sols de plateforme ferroviaire. Cette classification confère aux matériaux une aptitude naturelle à constituer un excellent support pour la plateforme ferroviaire, sans traitement spécial préalable.



Figure 20 : Dispositif de l'essai CBR (California Bearing Ratio) pour la détermination de la portance des sols

Tableau 49 : Synthèse de la portance CBR et classification UIC des sols de plateforme

Puits	CBR à 100% OPM	Classe de sol (UIC)	Désignation
P1 — PK 740+000	99	QS3	Bon sol
P2 — PK 742+000	77	QS3	Bon sol
P3 — PK 744+000	95	QS3	Bon sol
P4 — PK 746+000	98	QS3	Bon sol
P5 — PK 748+000	85	QS3	Bon sol
P6 — PK 750+000	84	QS3	Bon sol

**Figure 21** : valeur CBR a100% OPM sous tronçon PK 740+000 – PK 750+000

^

d) Classification GTR (Guide des Terrassements Routiers, version 2000)

Selon la classification GTR version 2000, les matériaux rencontrés appartiennent aux classes B4 et B5, c'est-à-dire des sols sableux et graveleux avec fines (graves peu argileuses) :

- Classe B4 (Puits P1 et P4) : graves peu argileuses, avec moins de 12 % de fines, caractéristiques mécaniques excellentes ($\text{CBR} \geq 98$).
- Classe B5 (Puits P2, P3, P5, P6) : graves argileuses avec fines, légèrement plus fines mais conservant d'excellentes propriétés mécaniques ($\text{CBR} \geq 77$).

Dans les deux cas (B4 et B5), ces matériaux sont réutilisables en remblai et en couche de forme sans traitement, conformément aux prescriptions de la fiche UIC 719 et des spécifications

SNTF.

e) Teneur en carbonates (CaCO_3)

Les teneurs en carbonates de calcium (CaCO_3) varient de 10,2 à 19,7 %, avec une valeur notable à 42,1 % pour le puits P5 (PK 748+000), reflétant la présence d'encroûtements grés-carbonatés caractéristiques de la Hammada saharienne. Ces teneurs élevées contribuent positivement à la stabilité intrinsèque des formations en conférant une cimentation naturelle aux agrégats.

5. ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES ET CLASSIFICATION DES SOLS :

Les analyses granulométriques ont été réalisées par tamisage à sec (NF P 94-056) et par sédiment métrie (NF P 94-057) pour la fraction fine. Les résultats confirment que les matériaux du tronçon PK 740+000 – PK 750+000 sont dominés par des graves limoneuses à sablo-graveleuses, avec des caractéristiques granulaires homogènes sur l'ensemble du linéaire.



Figure 22 : Synthèse des analyses granulométriques (Tronçon PK 740+000 – 750+000)

Tableau 50 : Synthèse des essais de laboratoire : Granulométrie et nature des sols

Puits / PK	Tamisé à 2 mm (%)	Tamisé à 80 µm (%)	ES (%)	VBS (g/100g)	Nature du sol
P1 — 740+000	40	11	—	0,00	Grave limoneuse peu plastique
P2 — 742+000	49	17	—	0,00	Grave limoneuse brunâtre
P3 — 744+000	42	15	—	0,00	Encroûtement grésocarbonaté
P4 — 746+000	45	12	—	0,00	Grave limoneuse compacte
P5 — 748+000	45	15	—	0,00	Encroûtement grésocarbonaté
P6 — 750+000	57	17	—	0,00	Grave limoneuse très compacte

Les courbes granulométriques obtenues en laboratoire révèlent une répartition granulaire continue avec un fuseau bien défini, dominé par les fractions grossières (graviers et sables), et des fines ($< 80 \mu\text{m}$) comprises entre 11 et 17 %, restant sous le seuil de 18 % requis pour la classe QS3. La valeur de bleu de méthylène (VBS = 0,00) confirme l'absence d'argiles actives dans la composition de ces matériaux.

6. GÎTES À MATÉRIAUX ET CARRIÈRES POUR GRANULATS :

6.1 Gîtes à matériaux — Gîte du PK 748+200 :

Dans le cadre de l'étude géologique menée le long du tronçon, quatre gîtes potentiels ont été recensés entre le PK 736 et le PK 750. Le gîte principal identifié est situé au PK 748+200, avec les coordonnées WGS 84 UTM 30 : X = 596 679, Y = 3 078 201.



Figure 23 Vue des travaux de terrassement et d'extraction au niveau du gîte principal situé au PK 748+200.

Tableau 51 : Descriptif lithologique de la reconnaissance au PK 748+200

Profondeur	Lithologie
0,00 – 0,20 m	Couverture sableuse caillouteuse brunâtre
0,20 – 1,70 m	Encroûtement grés-carbonaté à matrice gréseuse brunâtre à passées de cailloux

Résultats d'essais — Gîte du PK 748+200

Tableau 52 Résultats des essais de laboratoire – Gîte du PK 748+200

%Fines<80 μ	Ip (%)	WL (%)	CaCO ₃ (%)	γ_d OPM (t/m ³)	WOPM (%)	CBR 100%	LA (%)	Classe GTR	QS
14	8,2	27,8	27,8	2,10	7	82,38	31	B5	QS3

État hydrique et bilan du gîte du PK 748+200 :

- 14 % de fines : faible capacité de rétention d'eau — sol drainant
- Ip = 8,2 % : plasticité limitée — non sensible à l'eau
- Teneur en CaCO₃ = 27,8 % : apport notable de stabilité naturelle

- WOPM = 7 % : teneur en eau optimale faible — sol drainant
- Los Angeles LA = 31 % : résistance à la fragmentation moyenne à correcte

CBR = 82,38 % : portance très bonne, matériau utilisable sans traitement

Il s'agit d'un sol sablo-graveleux. L'état hydrique est globalement stable, peu plastique et peu influencé par l'eau. Ce matériau est directement utilisable pour la couche de forme et la partie supérieure des remblais.

6.2 Carrière pour granulats — Sud Express T.P à Oued Oum El Assel

Une carrière a été identifiée et analysée pour la fourniture de granulats destinés aux bétons (ouvrages hydrauliques) et au ballast. Il s'agit de la carrière Sud Express T.P, située à Oued Oum El Assel (tindouf). Les résultats d'essais sur granulats concassés sont présentés ci-dessous :

Tableau 53 Fiche de qualification des granulats : Carrière d'Oued Oum El Assel

Caractéristique / Essai	Fraction 0/3 (0/2)	Fraction 3/8 (2/7)	Fraction 8/15 (8/14)
Propreté Vbg (NF P18-591)	—	0,82	0,71
Coeff. d'aplatissement A% (NFP 18-561)	—	21	16
Équivalent de sable ES % (NF P18-598)	45	—	—
Fines % (<0,063 mm)	18	—	—
Masse volumique réelle (NF EN 1097-6)	2,64	2,64	2,63
Los Angeles LA % (NF EN 1097-1)	—	19	—
Attrition MDE % (NF EN 1097-2)	—	14	—
Résistance compression RC (kg/cm ²)	≥1200	≥1200	≥1200



Figure 24 Situation géographique et tracé du projet ferroviaire (PK 735+000 – PK 808+900)

Interprétation des résultats de la carrière :

- Les courbes granulométriques serrées indiquent une bonne continuité des fractions granulaires.
- Les propriétés mesurées sont satisfaisantes ($< 1\%$), conformément à la norme NF P18-591.
- Les coefficients d'aplatissement (21 % et 16 %) respectent la limite de 35 % fixée par la norme NF P18-561.
- L'équivalent de sable à 45 % sur la fraction 0/3 est légèrement faible (seuil $\geq 60\%$), indiquant quelques fines argileuses — à améliorer par concassage ou lavage.
- La teneur en fines à 18 % sur la fraction 0/3 est élevée (préférable $< 10\%$) — nécessite un lavage.
- La résistance Los Angeles à 19 % sur 3/8 est correcte (seuil $\leq 19\%$ pour ballast SNTF).
- L'attrition MDE à 14 % sur 3/8 est satisfaisante ($< 20\%$ selon la norme).

Les granulats concassés de la carrière Sud Express T.P sont de qualité moyenne à correcte. En l'état, ils sont utilisables pour les bétons et enrobés courants. Pour le ballast ferroviaire (exigences SNTF : $LA \leq 19\%$, $MDE \leq 6\%$), une attention particulière est requise sur les fines

et l'équivalent de sable.

7. CLASSIFICATION DES SOLS ET DES PLATEFORMES :

7.1 Classification des sols pour la plateforme (fiche UIC 719) :

La qualité d'un sol de plateforme ferroviaire dépend de deux paramètres fondamentaux selon la fiche UIC 719 :

- La nature géotechnique du sol (identification géotechnique selon ses caractéristiques physiques et mécaniques)
- Les conditions hydrogéologiques et hydrologiques locales (drainage, absence de nappe, évacuation des eaux de pluie)

Tableau 54 : Classification géotechnique des sols de plateforme ferroviaire (Référentiel UIC 719)

Classe UIC	Description géotechnique	Désignation
QS0	Sols organiques, sols fins > 15% fines foisonnés humides, sols thixotropes, sols avec matériaux solubles (gypse) ou polluants	Sols impropres
QS1	Sols avec > 40 % de fines, roches très évolutives, schistes altérés, sols avec 15–40 % fines non organiques, roches évolutives, MDE > 40 et LA > 40	Sols médiocres
QS2	Sols avec 5–15 % de fines, sols uniformes avec < 5 % fines ($Cu \leq 6$), roches moyennement dures ($25 < MDE \leq 40$ et $30 < LA \leq 40$)	Sols moyens
QS3	Sols avec < 5 % de fines, roches dures ($MDE \leq 25$ et $LA \leq 30$)	Bons sols ✓ (tronçon 736–750)

Pour le tronçon PK 736+000 – PK 750+000, la classe de portance dominante des sols de plateforme naturelle est QS3 (Bons sols), avec des valeurs CBR comprises entre 77 et 99. Cette classification favorable est directement liée à la nature graveleuse et peu argileuse des formations de Hammada saharienne rencontrées.

7.2 Classification des plateformes (P1, P2, P3) :

La portance d'une plateforme dépend à la fois de la qualité du sol constituant le corps de remblai (ou du sol en place en fond de déblai) et de la qualité et de l'épaisseur de la couche de forme.

On distingue trois classes de plateforme :

- P1 : Plateforme médiocre
- P2 : Plateforme moyenne
- P3 : Plateforme bonne (adoptée pour ce projet)

Tableau 55 : Synthèse des exigences de portance et classification des plateformes ferroviaires

Qualité sol (déblai/cœur remblai)	CBRmin (a)	Classe de plateforme	Qualité matériau couche forme	CBRmin (b)	Épaisseur mini couche forme (m)
QS3	10–17	P3	QS3	10–17	—
QS2	5	P2	QS2	5	—
QS2	5	P3	QS3	10–17	0,35
QS1	2–3	P2	QS2	5	0,50
QS1	2–3	P2	QS3	10–17	0,35
QS1	2–3	P3	QS3	10–17	0,50

Pour le tronçon PK 736+000 – PK 750+000 : le sol de plateforme naturelle étant de classe QS3 (CBR = 10–17), la plateforme adoptée est directement de type P3 sans couche de forme obligatoire. Cependant, une couche de forme de 35 cm en matériau QS3 est néanmoins prévue pour assurer un niveau de portance optimal et permettre la circulation des engins de chantier lors de la mise en œuvre des couches d'assise.

8. CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DE L'ASSISE — FICHE UIC 719-R :

8.1 Plateforme proposée :

Compte tenu de la classification du sol support selon la norme XP P94-011, le sol support le plus souvent rencontré le long du tracé est en majorité très dense (QS3). Conformément aux prescriptions données par la fiche UIC 719-R et la norme AREMA (Notice générale EF2 C20N°03), il est recommandé d'opter pour une plateforme de type P3.

8.2 Méthode de dimensionnement — Formule UIC 719 :

L'épaisseur totale de l'ensemble ballast + sous-couche est donnée par la formule de la fiche UIC 719 :

$$e \text{ [m]} = E + a + b + c + d + f + g$$

Tableau 56 Justification technique des épaisseurs de la structure de voie

Param.	Désignation	Valeur adoptée	Justification
E	Épaisseur de base selon classe de plateforme	0,45 m	Plateforme P3 (QS3)
a	Correction selon classe de voie (UIC 714)	0 m	Groupe 1 – Voie principale
b	Correction selon type et longueur de traverse	0,05 m	Traverse béton $L = 2,415 \text{ m}$ $b = (2,5 - L)/2 = 0,0425 \rightarrow 0,05 \text{ m}$
c	Correction selon type de dimensionnement	0 m	Dimensionnement normal
d	Correction charge nominale à l'axe	+ 0,15 m	Charge 32,5 T/essieu
f	Correction selon vitesse de la ligne	+ 0,05 m	Vitesse $\leq 160 \text{ km/h}$
g	Géotextile	0 m	Non requis sur QS3

$$e = 0.45 + 0 + 0.05 + 0 + 0.15 + 0.05 + 0 = 0.70 \text{ m}$$

8.3 Répartition des couches d'assise :

L'épaisseur totale des couches d'assise est fixée à 0,70 m. La répartition de chaque couche est présentée dans le tableau suivant, conformément à la fiche UIC 719 et à la norme ST590B :

Tableau 57 Composition et épaisseurs des couches d'assise de la voie (Structure P3)

N°	Couche	Épaisseur (cm)	Matériau / Norme
1	Ballast	30	Roche concassée — $LA \leq 19 \%$, $MDE \leq 6 \%$, fuseau 25/50 mm (EN 13450 / SNTF)
2	Sous-ballast	20	Grave concassée 0/31,5 mm — $V_{bg} \leq 1$, $A \leq 25$ (ST 590B fiche n°1)
3	Couche de fondation	20	Grave sableuse concassée — $V_{bg} \leq 1$, $A \leq 25$, $LA + MDE \leq 50$ (ST 590B fiche n°2)

4	Couche de forme QS3	35	Grave 0/D — $LA+MDE \leq 60$, $V_{bg} \leq 2$, $EV2 \geq 80 \text{ MN/m}^2$ (ST590B fiche n°4)
TOTAL	TOTAL	105 cm (dont 70 cm d'assise)	Plateforme type P3 — UIC 719



Figure 25 coupe transversale de la plateforme ferroviaire (type p3)

Figure 26 COUPE TYPE DE LA PLATEFORME FERROVIAIRE — PK 736+000 AU PK 750+000

△ RAIL UIC 60 (60 kg/m) — Longs Rails Soudés (LRS)	
TRAVERSE EN BÉTON BI-BLOCS (L = 2,415 m)	
BALLAST 25/50 mm — e = 30 cm	
SOUS-BALLAST 0/31,5 mm — e = 20 cm	
COUCHE DE FONDATION 0/31,5 mm — e = 20 cm	
COUCHE DE FORME QS3 (0/D) — e = 35 cm	
SOL EN PLACE — CLASSE QS3	

9. SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES MATÉRIAUX DE LA PLATEFORME :

9.1 Ballast :

Le ballast constitue la couche supérieure de la structure d'assise. Ses fonctions principales sont : la répartition des charges dynamiques engendrées par les circulations, la stabilité longitudinale et transversale de la voie, le drainage et l'évacuation rapide des eaux, et la possibilité de rectification géométrique par bourrage mécanisé.

Tableau 58 :Spécifications techniques et exigences de qualité du ballast ferroviaire

Caractéristique	Exigence / Valeur limite
Los Angeles (LA) — NF EN 1097-1	$\leq 19 \%$ (référentiel SNTF / NF P53-695)
Micro Deval (MDE) — NF EN 1097-2	$\leq 6 \%$
Résistance à la compression (RC)	$\geq 1\,200 \text{ kg/cm}^2$
Granulométrie	Fuseau 25/50 mm — EN 13450 / CEN/TC-154/SC-4
Propreté (passant 1,6 mm)	$\leq 0,5 \%$ de la masse
Forme des éléments	Polyédrique à arêtes vives
Matériau de base	Roche concassée (baste, calcaire dur, quartzite)

9.2 Couche de sous-ballast :

La couche de sous-ballast (ST590B fiche n°1) assure en complément du ballast la répartition des charges au niveau de la plateforme, assure la transition granulométrique entre le ballast et la plate-forme, protège la plate-forme du ruissellement des eaux et du gel. Elle est réalisée en grave propre entièrement concassée (0/31,5 mm), bien graduée, avec une propreté $V_{bg} \leq 1$ et un coefficient de forme $A \leq 25$. Son compactage doit atteindre q_1 (100 % OPM).

9.3 Couche de fondation :

La couche de fondation (ST590B fiche n°2) est la partie inférieure de la sous-couche. Elle permet la circulation des engins de chantier pour la mise en œuvre de la couche sous-ballast sans risque d'endommagement de la plateforme. Réalisée en grave sableuse entièrement concassée, avec $V_{bg} \leq 1$, $A \leq 25$ et $LA+MDE \leq 50$. Les matériaux peuvent provenir des sous-produits de carrières à ballast ou des alluvions d'oued.

9.4 Couche de forme de qualité QS3 :

La couche de forme (ST590B fiche n°4) adapte les caractéristiques aléatoires des matériaux de remblai ou du terrain en place aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques requises par la conception. Elle est exécutée en grave 0/D, avec $LA+MDE \leq 60$,

$V_{bg} \leq 2$. Son compactage doit atteindre la densification q_3 selon le guide GTR. Les exigences minimales sont : $\gamma_d \geq 100$ % OPM et $EV_2 \geq 80$ MN/m².

9.5 Remblai courant Spécifications :

Tableau 59 :Fiche technique des exigences pour la réalisation des remblais ferroviaires

Zone du remblai	Qualité matériau requise	Exigences de compactage
Partie supérieure du remblai (PST) — 1 m	QS3 — Fines < 12 % CBR ≥ 7 (min. 6 cas isolés)	$\gamma_d \geq 98$ % OPM $EV_2 \geq 45$ MPa
Partie inférieure du remblai	QS2 — Fines 12–50 % CBR ≥ 3	$\gamma_d \geq 98$ % OPM $EV_2 \geq 45$ MPa (fins) $EV_2 \geq 60$ MPa (graveleux)
Exigences mécaniques générales	Angle frottement $\varphi \geq 35^\circ$ Cohésion $c \geq 5$ kPa	Couches élémentaires Blocs < 2/3 épaisseur couche

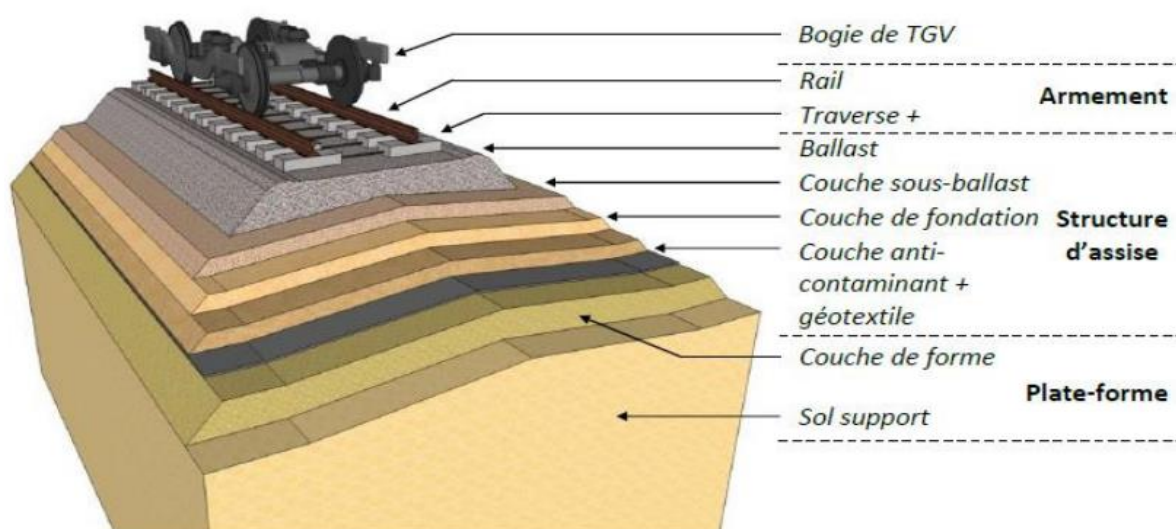


Figure 27 schéma d'une voie de LGV (Alias & Gentil, 1984)

10. ZONES À RISQUES GÉOTECHNIQUES :

L'analyse géotechnique du tronçon PK 736+000 – PK 750+000 conclut à l'absence de risques géologiques ou géotechniques majeurs susceptibles de compromettre la réalisation du projet :

Tableau 60 synthèse de l'évaluation des risques géotechniques (PK 736 – PK 750)

Risque évalué	Conclusion / Niveau de risque
Zones de failles actives	Absent — Pas de faille identifiée sur le tracé

Sebkha ou Fech-Fech	Absent — Terrain stable
Risque de cavitation	Absent
Risque de tassement différentiel	Absent — Sols très denses et homogènes
Nappe phréatique	Absent — Aucune trace d'eau dans les 6 puits
Ensablement éolien	Faible — Présence de dépôts sableux localisés sur la Hammada mais aucun risque actif d'ensablement sur la zone PK 736–750
Risque d'inondation	Présent — Des zones de risque d'inondation ont été identifiées et sont traitées dans le volet hydrologie/hydraulique par projection d'ouvrages hydrauliques adaptés

11. TERRASSEMENTS — MOUVEMENT DES TERRES ET MÉTHODES D'EXÉCUTION :

11.1 Analyse du mouvement des terres :

L'analyse du profil en long révèle que la ligne rouge du projet est plus élevée que le niveau du terrain naturel sur la majorité du tronçon PK 736+000 – PK 750+000. Cela implique que ce tronçon nécessite essentiellement des travaux de remblai pour atteindre le niveau de la plateforme ferroviaire projetée, avec peu ou pas de zones de déblai significatif.

11.2 Prescriptions pour l'exécution des terrassements :

Le long du tracé, les terrassements seront exécutés de sorte à disposer d'une plateforme de qualité minimale QS3. Les prescriptions suivantes doivent être respectées :

- Les terres végétales (le cas échéant) et les sables fins seront décapés sur toute leur épaisseur avant tout terrassement.
- Les sols de mauvaise qualité (QS0 ou QS1) rencontrés seront substitués par des matériaux de qualité suffisante (QS3 de préférence).
- Les matériaux de remblai seront mis en œuvre par couches élémentaires superposées, dont l'épaisseur sera déterminée en fonction de la nature du matériau et du compacteur utilisé.
- La dimension des plus gros blocs ne doit pas dépasser les deux tiers de l'épaisseur de la couche élémentaire.

- Le taux de compactage requis est $\gamma_d \geq 95$ % OPM pour le corps de remblai courant, et $\gamma_d \geq 100$ % OPM pour la couche de forme et les couches d'assise.
- Un dispositif de drainage doit être mis en place pour éviter l'accumulation d'eau dans les zones basses du profil.

12. COMPACTAGE DE LA PLATEFORME FERROVIAIRE :

12.1 Principes généraux du compactage en infrastructure ferroviaire :

Le compactage est l'opération fondamentale qui confère à chaque couche de la plateforme ferroviaire sa stabilité mécanique durable. Son objectif est d'atteindre une densité sèche minimale, exprimée en pourcentage de l'Optimum Proctor Modifié (OPM), tout en garantissant un module de déformation EV2 suffisant à la plaque.

Conformément au Guide Technique de Réalisation des Terrassements Routiers (GTR, SETRA/LCPC 1992) et aux prescriptions de la fiche UIC 719-R, trois paramètres principaux gouvernent le choix du matériel de compactage et le nombre de passes à effectuer :

- La nature et la classe GTR du matériau (B.4 / B.5 pour ce projet).
- L'épaisseur de la couche mise en œuvre (20 à 40 cm selon la couche).
- Le type d'engin de compactage et son mode d'action (statique ou vibratoire, pneumatique ou cylindre lisse).

12.2 Matériels de compactage utilisés :

12.2.1 Compacteur à cylindres lisses vibrants tandem (CV) :

Le compacteur à cylindres lisses vibrants tandem est l'engin de référence pour le compactage des couches d'assise de la plateforme ferroviaire (sous-ballast, couche de forme, couche de fondation). Il agit par vibration et par effet de masse, produisant une densification uniforme sur toute l'épaisseur de la couche. Ses caractéristiques techniques pour ce chantier :

- Modèles de référence : DYNAPAC CA 250D, BOMAG BW 213DH, CATERPILLAR CS 533.
- Masse en service : 10 à 18 tonnes.
- Amplitude vibratoire : 0,8 à 1,8 mm — Fréquence : 28 à 33 Hz.
- Largeur de compactage effective : 1,80 à 2,20 m.
- Applications sur ce chantier : couche de forme QS3, sous-ballast, couche de fondation, partie supérieure du remblai.

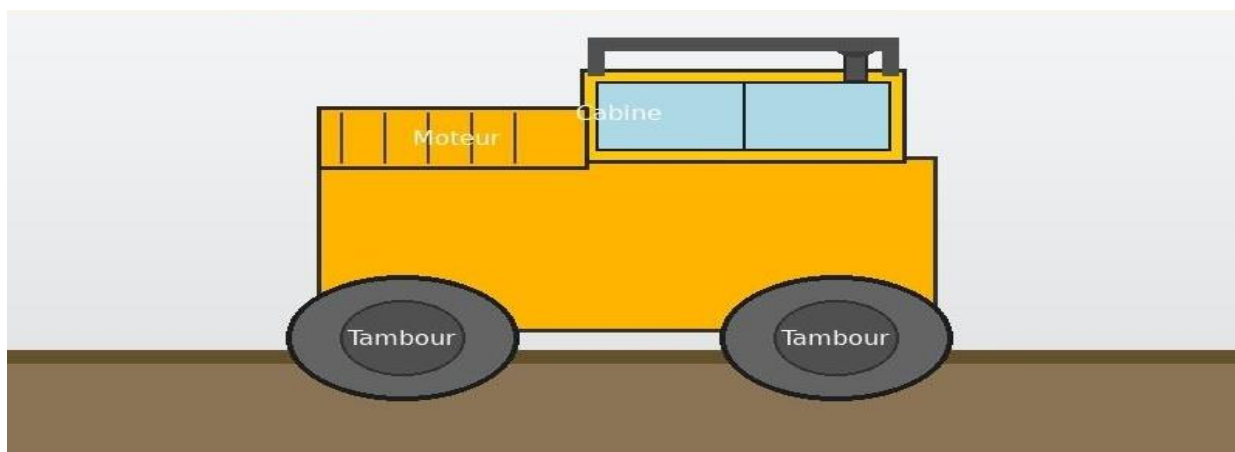


Figure 28 Compacteur à Cylindres Lisses Vibrants Tandem (CV) — Type DYNAPAC CA 250D / BOMAG BW 213DH

12.2.2 Compacteur monocylindre vibrant (CM) :

Le compacteur monocylindre vibrant est adapté aux travaux de remblai en couches épaisses et aux matériaux graveleux grossiers. Il est particulièrement efficace pour le compactage du corps de remblai en grave limoneuse (classes GTR B.4/B.5), rencontrée tout au long du sous-tronçon étudié. Ses caractéristiques :

- Modèles de référence : BOMAG BW 226DH-4, DYNAPAC CA 302D, CATERPILLAR CS 583.
- Masse en service : 10 à 25 tonnes — Tambour simple vibrant à l'avant.
- Action par choc et vibration sur couche épaisse (30 à 40 cm).
- Applications : corps de remblai TVO en grave limoneuse B.4/B.5, couche de fondation en grave concassée.

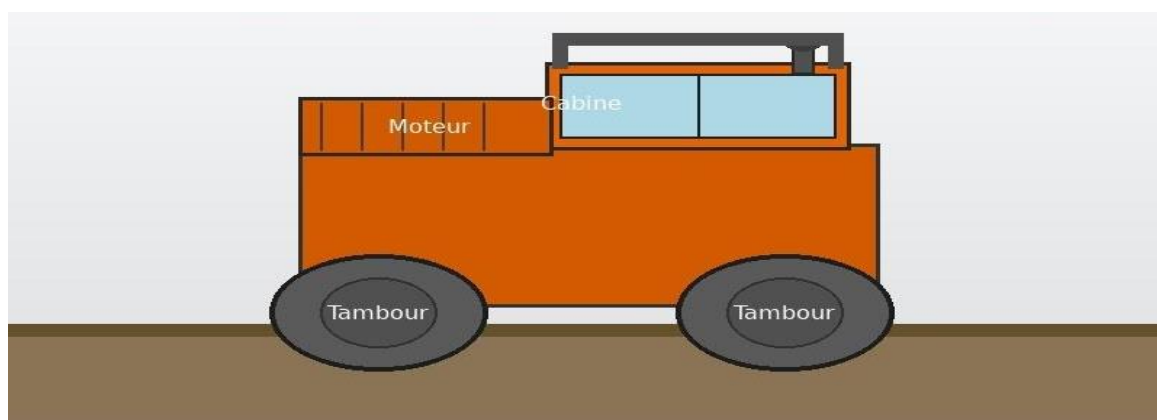


Figure 29 Compacteur Monocylindre Vibrant (CM) — Type BOMAG BW 226DH-4 / DYNAPAC CA 302D

12.2.3 Compacteur pneumatique (CP) :

Le compacteur à pneus (pneumatique) est particulièrement adapté au compactage des sols graveleux et sablo-graveleux tels que les graves limoneuses B.4/B.5 rencontrées sur ce chantier. Son effet de pétrissage et de malaxage, combiné à une forte pression de contact réglable, lui confère une efficacité supérieure sur les matériaux à granulométrie étalée. Ses caractéristiques :

- Modèles de référence : DYNAPAC CP 274, CATERPILLAR PS 300B, HAMM GRW 280.
- Masse en service : 18 à 32 tonnes — Pression de gonflage réglable : 3,5 à 8,5 bars.
- Excellent effet de pétrissage sur matériaux graveleux et sablo-limoneux.
- Applications : corps de remblai TVO tout-venant, partie supérieure du remblai (PSR — QS3).

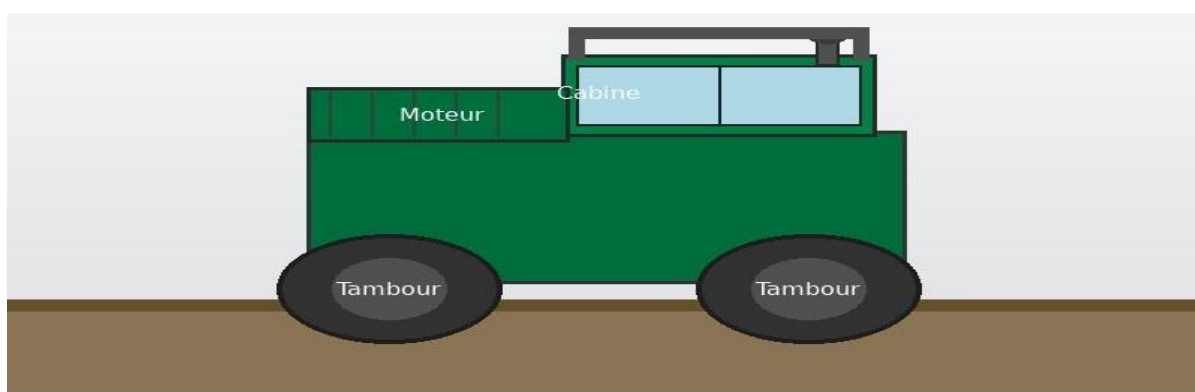


Figure 30 Compacteur Pneumatique (CP) — Type DYNAPAC CP 274 / CATERPILLAR PS 300B

12.3 Formules de calcul du nombre de passes :

Le nombre de passes de compactage nécessaires pour atteindre la densité sèche cible est déterminé à partir de deux formules complémentaires issues du Guide Technique des Terrassements Routiers (GTR, SETRA/LCPC 1992) :

FORMULE 1 — Épaisseur maximale compactable par passe :

$$e_{max}(cm) = k \times \sqrt{M} \quad \text{avec : } k = 15 \text{ (cylindre vibrant)} \mid k = 12 \text{ (pneumatique)} \mid M$$

= masse (t)

FORMULE 2 — Nombre de passes N :

$$N = \frac{e_{réelle}}{e_{max} \times \alpha} \quad \text{avec : } \alpha = \text{coefficient de sécurité} = 0.65$$

L'application numérique de ces formules pour chaque couche du sous-tronçon PK 740+000 – PK 750+000, avec un coefficient de sécurité $\alpha = 0,65$, donne les résultats suivants :

Tableau 61 Application numérique des formules GTR pour le sous-tronçon PK 740+000–750+000 ($\alpha = 0,65$)

Couche	Engin (M)	k	$e_{\max} = k\sqrt{M}$	$e_{\max} \times \alpha$	e réelle	α	N passes
Remblai TVO (B.4/B.5)	CP 25 t	12	$12 \times \sqrt{25} = 60$ cm	$60 \times 0,65 = 39$ cm	35 cm	0,65	≈ 6
PSR — QS3 sup.	CV 12 t	15	$15 \times \sqrt{12} = 52$ cm	$52 \times 0,65 = 34$ cm	30 cm	0,65	≈ 8
Couche de forme QS3	CV 12 t	15	$15 \times \sqrt{12} = 52$ cm	$52 \times 0,65 = 34$ cm	35 cm	0,65	≈ 10
Couche de fondation	CM 15 t	15	$15 \times \sqrt{15} = 58$ cm	$58 \times 0,65 = 38$ cm	20 cm	0,65	≈ 4
Sous-ballast	CV 10 t	15	$15 \times \sqrt{10} = 47$ cm	$47 \times 0,65 = 31$ cm	20 cm	0,65	≈ 5

12.4 Nombre de passes recommandé par couche :

Sur la base des formules GTR et des planches de compactage de référence, le tableau ci-après récapitule le nombre de passes recommandé pour chaque engin et chaque type de couche, à teneur en eau optimale ($w \approx WOPM \pm 1\%$). L'objectif de compacité est fixé à $\gamma_d \geq 100\%$ OPM pour les couches d'assise, et $\gamma_d \geq 98\%$ OPM pour le corps de remblai.

Tableau 62 Nombre de passes recommandé par engin et par type de couche (GTR, SETRA 1992 — adapté au ferroviaire)

Type de couche / Remblai	Ép. couche	Engin (réf.)	CM vibrant (passes)	CV tandem (passes)	CP pneum. (passes)	Objectif compacité
Remblai TVO — Grave limoneuse B.4/B.5	30–40 cm	CP 25 t	6 à 8	8 à 10	6 à 8	$\gamma_d \geq 98\%$ OPM
Partie supérieure remblai (PSR — QS3)	20–30 cm	CV 12 t	6 à 8	8 à 10	8 à 10	$\gamma_d \geq 100\%$ OPMEV2 ≥ 45 MPa
Couche de fondation (grave concassée)	20 cm	CM 15 t	4 à 6	6 à 8	Non adapt.	$\gamma_d \geq 100\%$ OPMEV2 ≥ 60 MPa
Couche de sous-ballast (0/31,5 mm)	20 cm	CV 10 t	Non adapt.	4 à 6	Non adapt.	$\gamma_d \geq 100\%$ OPM

Couche de forme QS3 (grave 0/D)	35 cm	CV 12 t	6 à 8	8 à 10	8 à 10	EV2 $\geq$ 80 MPa
--	--------------	--------------------	--------------	---------------	---------------	-------------------------------------

12.5 Conditions de mise en œuvre et contrôle :

La réussite du compactage dépend de conditions de mise en œuvre strictement contrôlées. Les prescriptions suivantes s'appliquent sur le sous-tronçon PK 740+000 – PK 750+000 :

- Teneur en eau : Maintenir w dans la plage WOPM ± 1 %. Pour les graves limoneuses B.4/B.5 du projet, WOPM ≈ 7 %. En contexte saharien (forte chaleur, sécheresse), un arrosage léger avant compactage est impératif.
- Vitesse de l'engin : Vitesse limite de 3 à 5 km/h pour les cylindres vibrants, 4 à 6 km/h pour les pneumatiques. Un compactage trop rapide réduit l'efficacité et nécessite davantage de passes.
- Recouvrement latéral : Minimum 1/3 de la largeur de bande avec la passe précédente pour éviter les zones non compactées entre bandes.
- Contrôle in situ : Densité en place par gammadensimètre (1 essai / 500 m² minimum pour les couches d'assise) et essai à la plaque EV2 (1 essai / 1 000 m linéaires).
- Planche d'essai : Obligatoire en début de chantier pour chaque couple (engin + matériau + épaisseur) afin de valider le nombre de passes et l'ajuster selon les conditions réelles du site.

12.6 Récapitulatif du scénario de compactage retenu :

Scénario de compactage retenu — PK 740+000 au PK 750+000 :

- Corps de remblai TVO : CP 18–32 t OU CM 12–25 t — 6 à 8 passes — couches 30–40 cm — $\gamma_d \geq 98\%$ OPM
- Partie supérieure remblai (PSR) : CP + CV — 8 à 10 passes — couches 20–30 cm — $\gamma_d \geq 100\%$ OPM, EV2 ≥ 45 MPa
- Couche de forme QS3 (35 cm) : CV tandem 10–14 t — 8 à 10 passes — vitesse 3–4 km/h — EV2 ≥ 80 MPa
- Couche de fondation (20 cm) : CM — 4 à 6 passes — $\gamma_d \geq 100\%$ OPM, EV2 ≥ 60 MPa
- Sous-ballast (20 cm) : CV tandem — 4 à 6 passes — compacité q_1 ($\gamma_d \geq 100\%$ OPM) — contrôle plaque avant ballast.

13. CONCLUSION :

L'étude géotechnique du tronçon PK 740+000 à PK 750+000 démontre une adéquation remarquable entre les conditions naturelles du site et les exigences techniques nécessaires à la réalisation d'une infrastructure ferroviaire de haute performance. La caractérisation exhaustive des sols, appuyée par une campagne d'essais in situ et de laboratoire rigoureuse, a permis d'établir une classification dominante en **QS3**, confirmant ainsi la robustesse du support naturel de la plateforme. Ce contexte géologique favorable, allié à une stratégie de dimensionnement conforme aux normes internationales (UIC 719-R), assure une stabilité durable face aux sollicitations exceptionnelles induites par le trafic minéralier lourd de 32,5 tonnes par essieu.

Le choix d'une plateforme de type **P3**, renforcée par une structure multicouche optimale de 1,05 mètre d'épaisseur, répond avec précision aux impératifs de répartition des contraintes et de pérennité de l'assise. Les spécifications techniques définies pour les matériaux — notamment la rigueur apportée à la qualité du ballast et au compactage des couches de forme — constituent les piliers de cette fiabilité structurelle. Bien que l'analyse ait souligné la nécessité de traitements spécifiques pour certains granulats locaux et une gestion rigoureuse des risques d'inondation, la maîtrise technique démontrée tout au long de cette étude garantit une conception résiliente.

Enfin, ce chapitre confirme la faisabilité technique du tracé et valide le choix des méthodes d'exécution retenues. La synergie entre la qualité des matériaux sélectionnés, le strict respect des protocoles de compactage et la pertinence des structures d'assise proposées confère au projet de la ligne Béchar–Tindouf une base solide. Ces résultats attestent non seulement de la sécurité et de la durabilité de l'ouvrage, mais également de la pertinence de l'approche intégrée adoptée par le groupement SETIRAIL/CIDEM/SETS/SAETI, assurant ainsi la réussite de ce projet ferroviaire stratégique.

Chapitre 5

Ouvrages d'Art et Contraintes Spécifiques du Milieu Saharien

Chapitre 5 : Ouvrages d'Art et Contraintes Spécifiques du Milieu Saharien

1. INTRODUCTION :

La structure de la voie ferrée est l'ensemble des éléments qui, posés sur la plateforme, assurent le guidage des véhicules, la transmission des charges au sol et la tenue géométrique permanente de la voie. Ce chapitre présente le choix du type de voie, l'étude de ses composants principaux (rails, traverses, ballast, sous-ballast), les modalités de stockage, les méthodes de pose et de soudage, les machines de réglage et nettoyage, ainsi que les essais de réception, conformément aux normes ANESRIF, SNTF, UIC et EN applicables au projet Gara Djebilet–Béchar.

2. CHOIX DU TYPE DE VOIE :

Deux grandes familles de superstructure ferroviaire existent : la voie ballastée et la voie sur dalle béton. L'analyse comparative ci-après, adaptée aux conditions du projet Gara Djebilet (climat saharien, charge essieu 32,5 T, ressources locales granite), conduit au choix de la voie ballastée.



Figure 31 Vue des travaux de terrassement et de la plateforme en cours de préparation (Tronçon Tindouf)

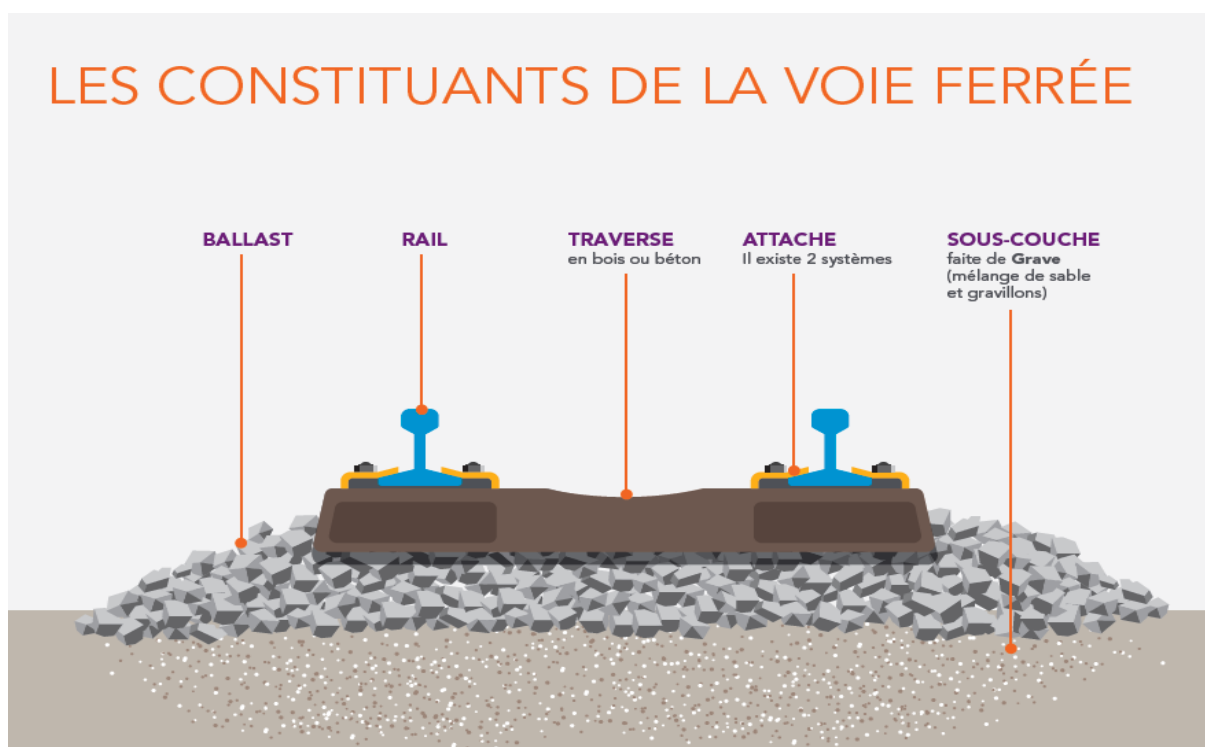
Tableau 63 Analyse comparative – Voie Ballastée vs Voie sur Dalle – Projet Gara Djebilet

Critère	Voie Ballastée	Voie sur Dalle	Choix
Coût initial (CAPEX)	Faible (référence)	×1,5 à 2,0	✓ Ballastée
Charge essieu admise	≤ 35 T	≤ 30 T (std)	✓ Ballastée
Matériaux locaux	Granite Béchar disponible	Ciment importé	✓ Ballastée
Expérience SNTF/ANESRIF	Très bonne	Limitée	✓ Ballastée
Adaptabilité géométrique	Excellente (bourrage)	Difficile	✓ Ballastée
Score global	8,2 / 10	6,5 / 10	✓ BALLASTÉE

La voie ballastée est retenue pour l'ensemble du tronçon, conformément aux prescriptions ANESRIF/SNTF.

3. COMPOSANTS D'UNE VOIE FERRÉE BALLASTÉE :

La voie ferrée ballastée se compose de trois éléments principaux : le rail, les traverses et le ballast, assemblés par des organes de fixation (attaches, semelles, tirefonds)


Figure 32 Schéma fonctionnel des composants d'une voie ferrée ballastée

3.1 Trois profils UIC sont utilisés sur les réseaux ferroviaires :

UIC 46, UIC 54 et UIC 60. Le profil retenu pour la ligne Béchar–Gara Djebilet est le rail UIC 60, le plus performant de la famille, adapté aux charges lourdes et aux vitesses élevées.

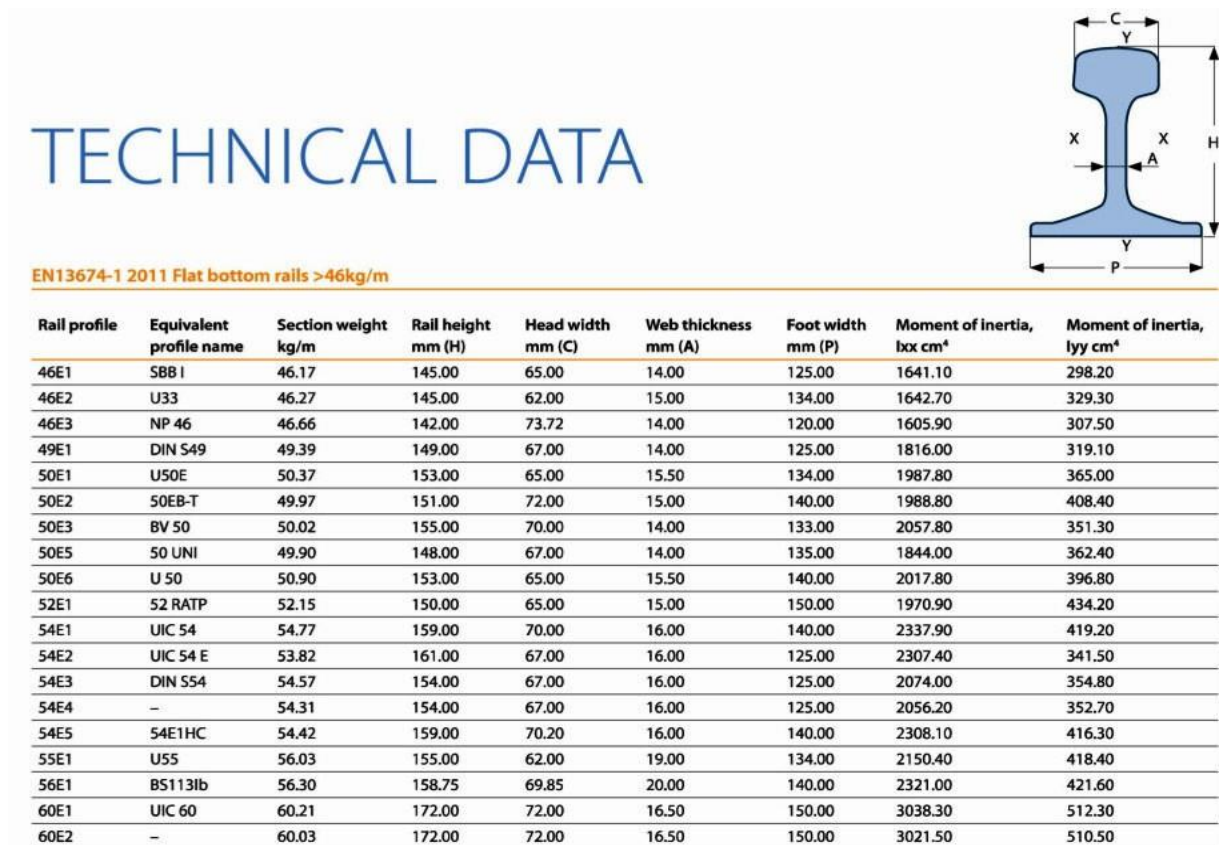


Figure 33 Caractéristiques géométriques et mécaniques des différents profils de rails selon la norme EN 13674-1

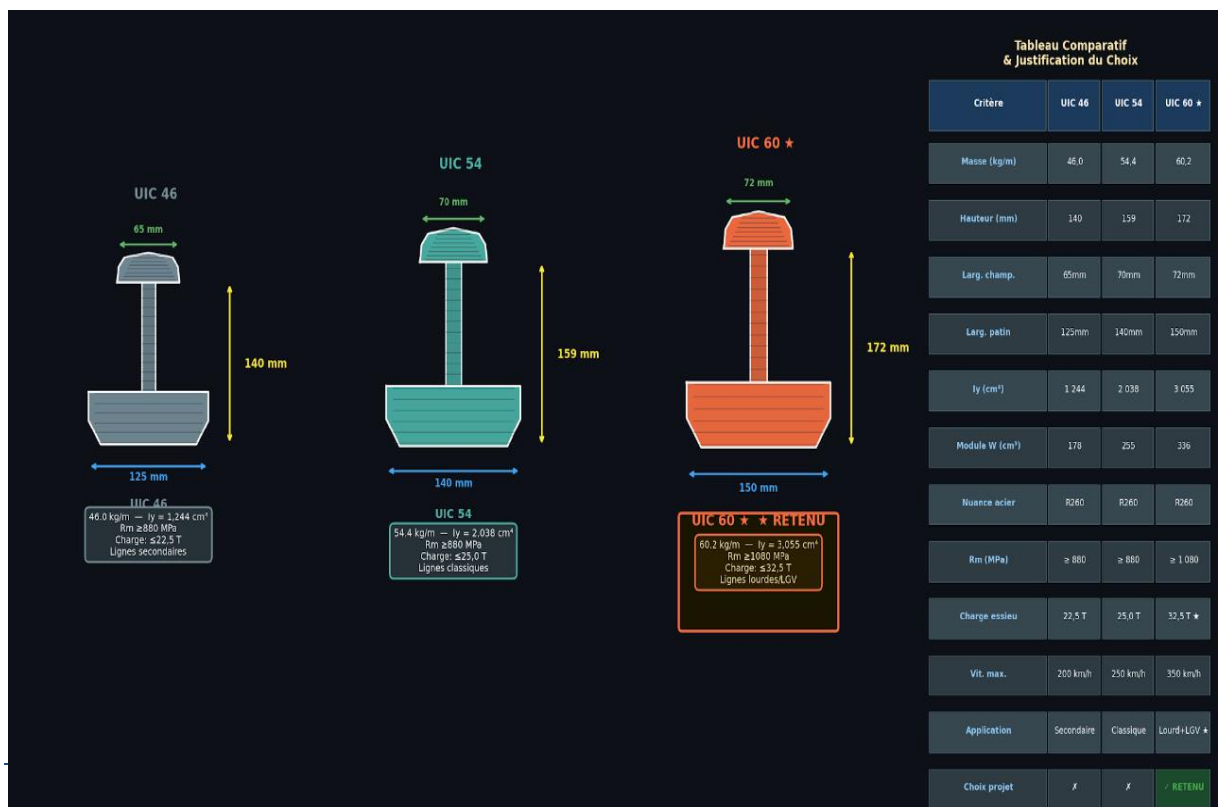


Figure 34 : Comparaison des profils de rail : UIC 46 / UIC 54 / UIC 60 ★ Retenu – Sections et caractéristiques

Tableau 64 Comparaison des profils de rail UIC

Profil	Masse (kg/m)	Hauteur (mm)	Iy (cm ⁴)	Charge essieu max	Application
UIC 46	46,0	140	1 244	≤ 22,5 T	Lignes secondaires
UIC 54	54,4	159	2 038	≤ 25,0 T	Lignes classiques
UIC 60 ★	60,2	172	3 055	≤ 32,5 T	Lignes lourdes / LGV

3.2 Caractéristiques du Rail UIC 60 :

Le rail UIC 60 (60 E1 selon EN 13674-1) est composé de trois parties : champignon (roulement et guidage), âme (transmission des efforts) et patin (répartition sur traverses). Il est posé en Longs Rails Soudés (LRS) avec une température neutre de pose $T_n = 30^{\circ}\text{C}$, adaptée au climat saharien de la région de Tindouf.



Figure 35 Vue de profil et stockage des rails de type UIC 60 avant mise en œuvre.

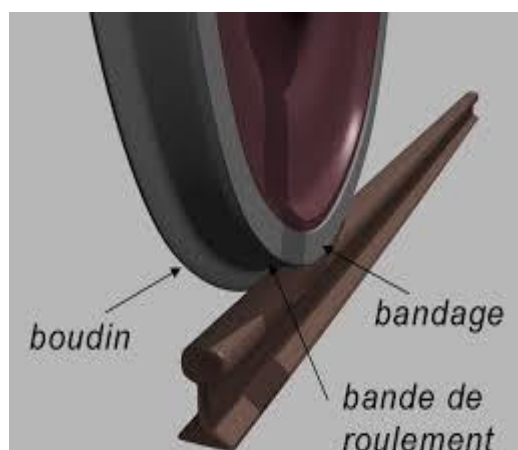


Figure 36 : Interface roue-rail : détail des composants de la roue et zones de contact

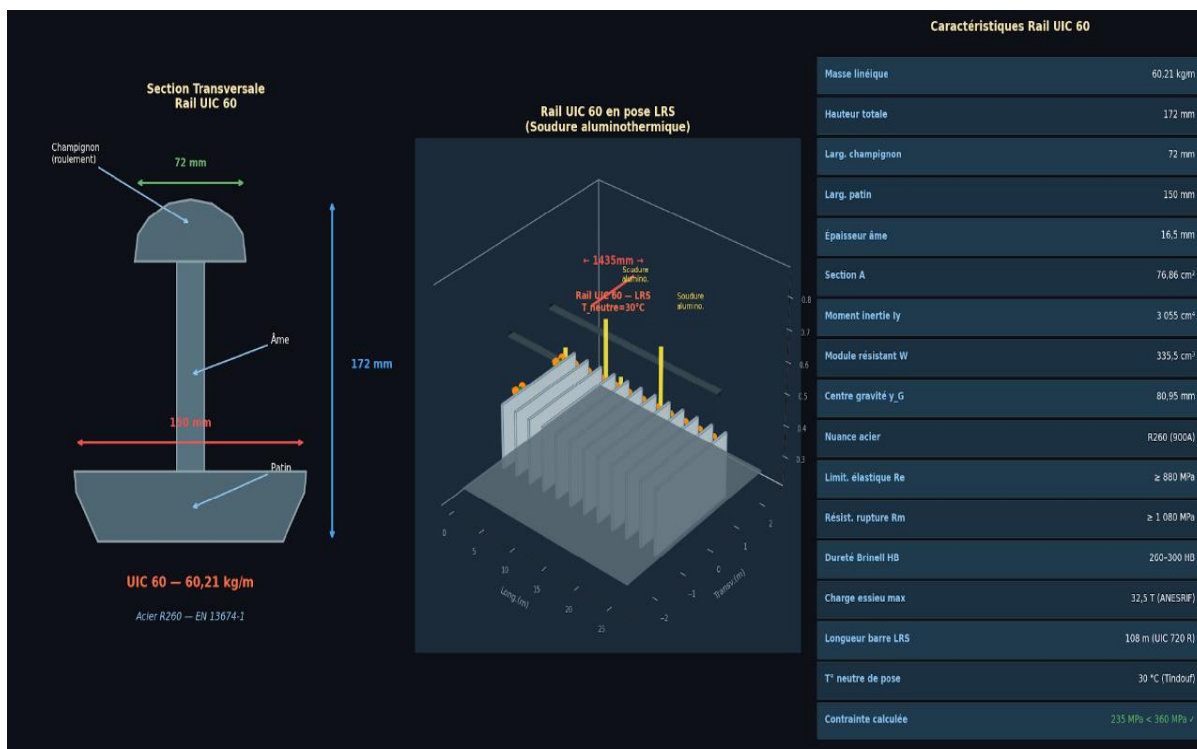


Figure 37 Rail UIC 60 : Section transversale (gauche), pose LRS avec soudures (centre), caractéristiques (droite)

Tableau 65 :Caractéristiques mécaniques du Rail UIC 60 – EN 13674-1

Paramètre	Valeur	Norme
Masse linéique	60,21 kg/m	UIC 860
Hauteur totale h	172 mm	EN 13674-1
Largeur champignon b_c	72 mm	EN 13674-1
Largeur patin b_p	150 mm	EN 13674-1
Section A	76,86 cm²	–
Moment d'inertie Iy	3 055 cm⁴	–
Module résistant W_y	335,5 cm³	–
Nuance acier	R260 (900A)	EN 13674-1
Limite élastique Re	≥ 880 MPa	EN 13674-1
Résistance rupture Rm	≥ 1 080 MPa	EN 13674-1
Dureté Brinell	260–300 HB	EN 13674-1
Charge essieu admise	32,5 T	ANESRIF
Longueur barre LRS	108 m	UIC 720 R
T° neutre de pose	30 °C (Tindouf)	UIC 720 R

3.3 Types de Traverses – Traverse Bi-Bloc Retenue:

Les traverses assurent le maintien de l'écartement (1 435 mm UIC), la répartition des charges vers le ballast et la résistance aux forces longitudinales et transversales. Quatre types principaux existent : bois, béton monobloc, béton bi-bloc et acier.



Figure 38 Pose mécanisée de traverses en béton bi-bloc à l'aide d'un portique de manutention



Figure 39 Stockage Industriel De Traverses En Béton Bi-Bloc Sur Le Site De Préfabrication



Figure 40 Vue En Perspective D'une Voie Ferrée En Courbe Équipée De TRAVERSEES EN BÉTON



Figure 41 Dimensions Géométriques D'une Traverse En Béton Monobloc

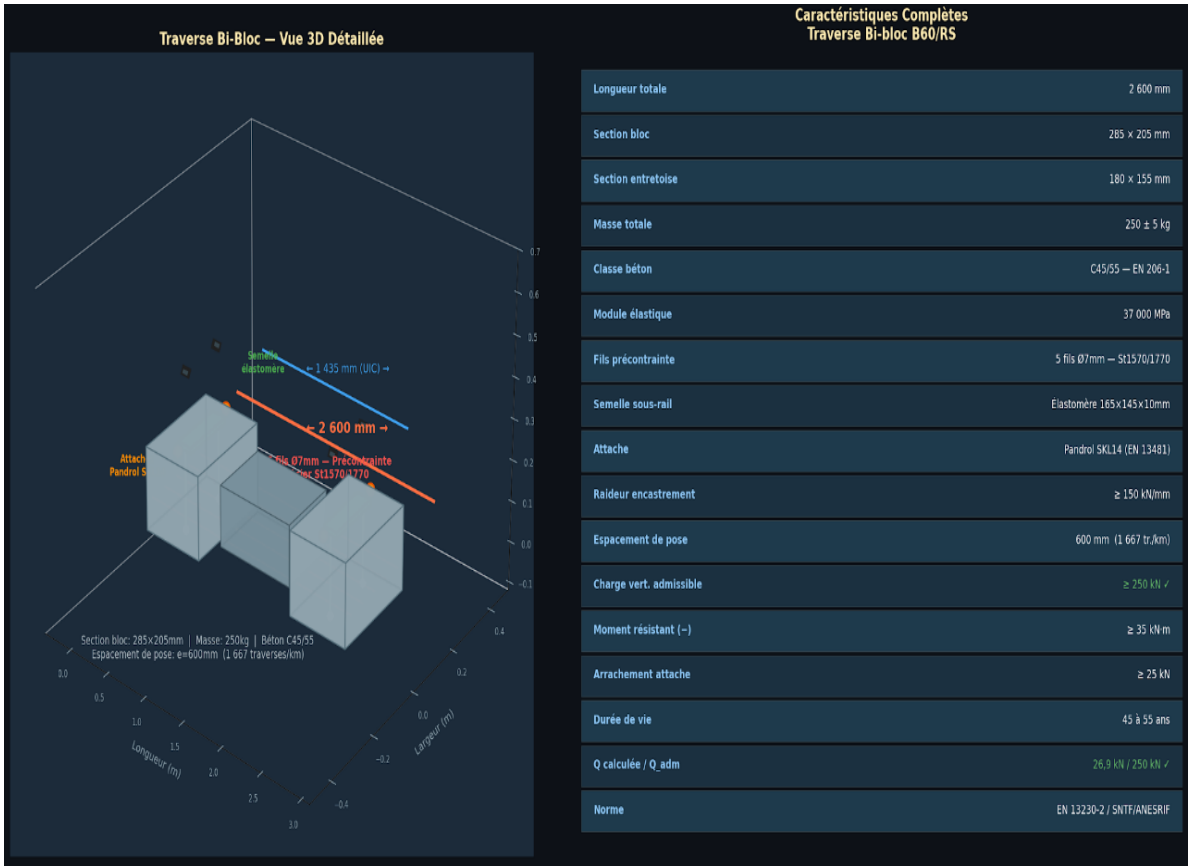


Figure 42 : Traverse bi-bloc béton précontraint : Vue 3D détaillée – L=2 600mm, fils Ø7mm, attaches Pandrol SKL14

Tableau 66 : Comparaison des types de traverses – Choix pour Gara Djebilet

Type	Masse (kg)	Durée vie	Avantages principaux	Score
Bois	70–90	20–25 ans	Souplesse, légèreté	4/10
Béton monobloc	260–290	40–50 ans	Rigide, économique	7/10
Béton bi-bloc ★	245–255	45–55 ans	Légère, LRS, durabilité saharienne	9/10 ✓
Acier	80–100	30–40 ans	Résistante, recyclable	6/10

Tableau 67 : Caractéristiques de la traverse bi-bloc béton précontraint B60

Paramètre	Valeur	Norme
Longueur totale	2 600 mm	SNTF/ANESRIF
Section du bloc	285 × 205 mm	EN 13230-2
Masse totale	250 ± 5 kg	–
Béton	C45/55 – EN 206-1	EN 206-1
Fils de précontrainte	5 fils Ø7mm – St1570/1770	EN 10138
Semelle sous-rail	Élastomère 165×145×10mm	EN 13481
Attache	Pandrol SKL14	EN 13481
Espacement de pose	600 mm (1 667 tr./km)	SNTF
Charge verticale admissible	≥ 250 kN	EN 13230-2
Durée de vie	45 à 55 ans	–

4. COUCHE D'ASSISE : BALLAST ET SOUS-BALLAST :

La pérennité de la superstructure ferroviaire, particulièrement sur une ligne à forte charge axiale comme celle de Béchar–Gara Djebilet, repose sur la qualité et le dimensionnement rigoureux de la couche d'assise. Celle-ci se compose de deux éléments distincts mais complémentaires.

4.1 Ballast – Granite 25/50 mm :

Le ballast en granite de granulométrie 25/50 mm, conforme à la norme **EN 13450 Classe F1**, est retenu pour le projet. Le choix du granite provenant de la région de Béchar, caractérisé par

un coefficient d'usure Los Angeles (LA) compris entre 8 et 11 %, est stratégique. Cette dureté exceptionnelle garantit :

Une stabilité latérale et longitudinale : Grâce à l'angularité des granulats, le ballast assure le maintien en place des traverses, crucial pour la sécurité lors du passage de trains lourds.

Une capacité de drainage optimale : La granulométrie 25/50 mm crée un réseau de vides interconnectés permettant une évacuation rapide des eaux de ruissellement, évitant ainsi l'altération de la plateforme.

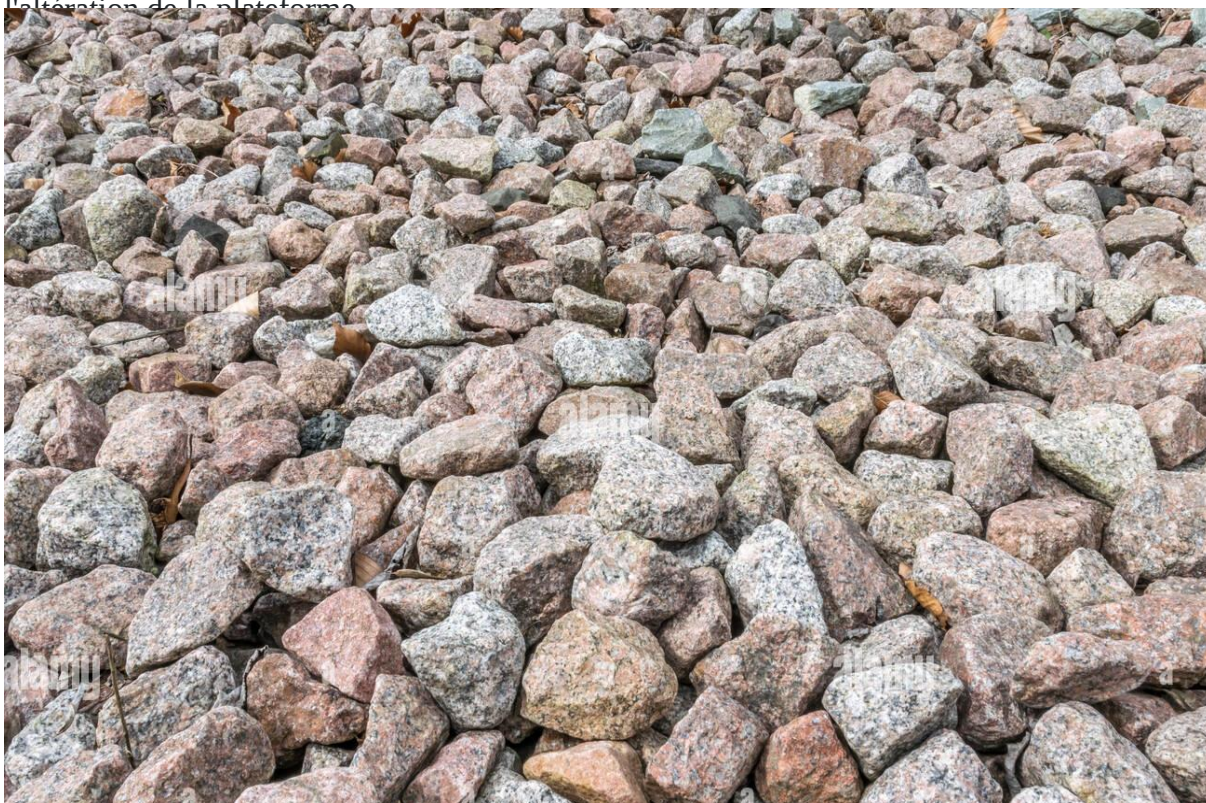


Figure 43 Ballast En Granite De Granulométrie 25/50 Mm Utilisé Pour La Voie Ferrée



Figure 44 Superstructure Avec Mise En Place Du Ballast Autour Des Traverses

Tableau 68 Spécifications du ballast granite 25/50 mm – EN 13450 Classe F1

Propriété	Valeur requise	Granite Béchar	Conformité
Classe granulaire	25/50 mm	25/50 mm	✓
Los Angeles LA	$\leq 12 \%$	8–11 %	✓
Micro-Deval MDE	$\leq 7 \%$	4–6 %	✓
Indice de forme A	≤ 20	14–18	✓
Teneur fines < 0,5mm	$\leq 0,5 \%$	0,2–0,4 %	✓
Épaisseur de pose	300 mm	300 mm	✓
Épaulement latéral	$\geq 300 \text{ mm}$	300 mm	✓

4.2 Sous-ballast – Couche de protection et de répartition :

Le sous-ballast, constitué de matériaux granulaires de type 0/31.5 mm, joue un rôle déterminant dans la structure de la voie, agissant comme interface mécanique entre le ballast et la plateforme (sol support). Ses fonctions principales sont :

Séparation des couches : Il prévient la migration des fines provenant de la plateforme vers le ballast (phénomène de colmatage), garantissant ainsi la conservation des propriétés drainantes du ballast sur le long terme.

Répartition des contraintes : Il diffuse les pressions verticales transmises par les traverses sur une surface élargie, réduisant ainsi les contraintes unitaires exercées sur le sol support pour éviter tout poinçonnement.

Protection et filtration : En zone saharienne, cette couche stabilise le sol contre les variations hygrométriques et facilite le compactage nécessaire pour atteindre le module de déformation requis (Ev2).

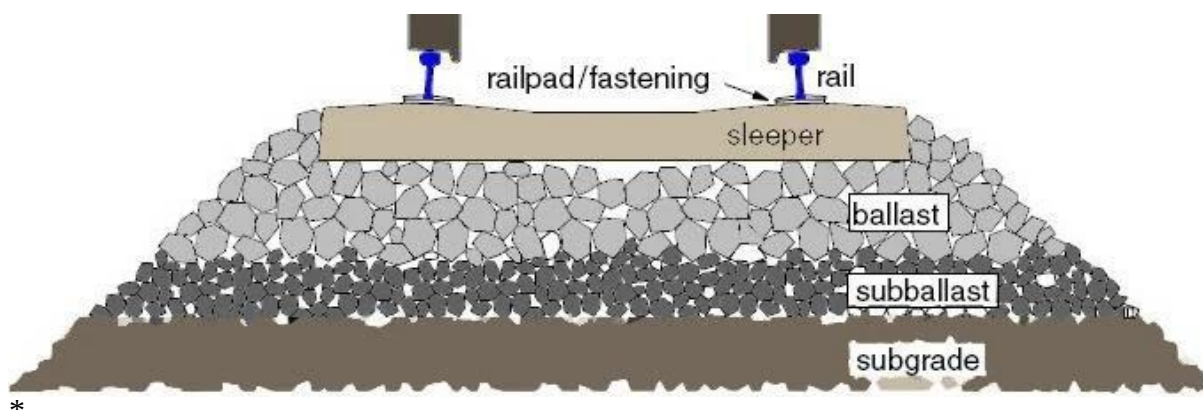


Figure 45 Coupe Transversale De La Superstructure Ferroviaire Montrant La Stratification Des Couches De Ballast, De Sous-Ballast Et De Plateforme

5. ATTACHES, ÉCLISSAGE ET FIXATIONS :

Le système de fixation du rail sur la traverse assure la stabilité géométrique de la voie et l'isolation électrique entre les deux rails (pour la signalisation). Sur la ligne Béchar–Gara Djebilet, l'attache élastique Pandrol SKL14 est retenue, associée à une semelle élastomère et une plaquette d'appui.

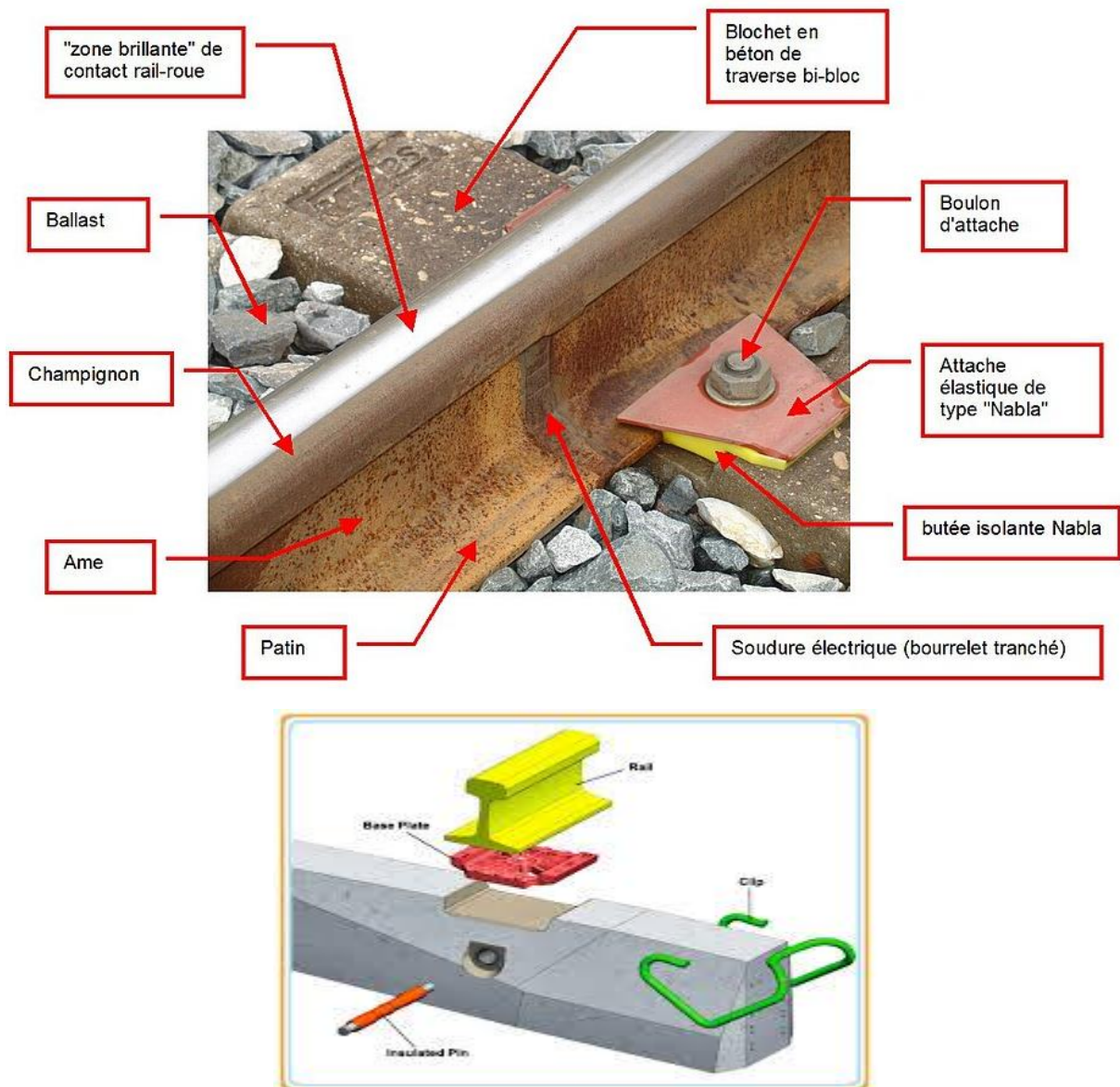


Figure 47 Vue éclatée des composants de fixation d'un rail sur une traverse en béton



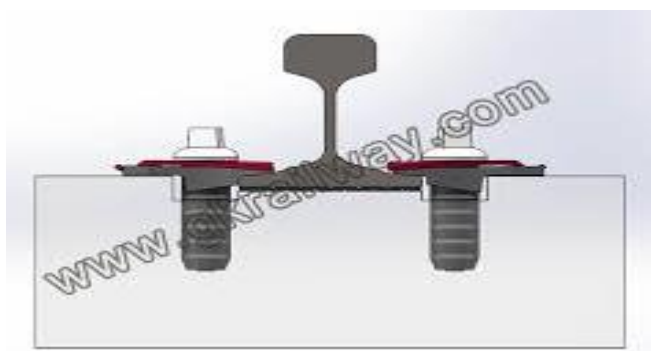


Figure 47 Boulon d'attache et ensemble de fixation mécanique pour rail



Figure 49 Boulons D'assemblage Pour Assemblage D'éclisses De Rail

5.1 Système d'Attache Pandrol SKL14 :

- Raideur à l'encastrement : $\geq 150 \text{ kN/mm}$ (EN 13481).
- Force de serrage nominal : 14 kN par attache (2 attaches par rail par traverse).
- Résistance à l'arrachement : $\geq 25 \text{ kN}$.
- Isolation électrique : résistance $\geq 10 \text{ k}\Omega$ (signalisation par circuit de voie).
- Durée de vie : ≥ 30 ans sans remplacement en service normal.

5.2 Éclissage des Joints de Rail :

Aux joints de dilatation et aux extrémités de barres LRS, des éclisses en acier R260 (4 par joint, boulonnées M24) assurent la continuité mécanique. Le jeu de dilatation j est calculé selon :

$$j = \alpha \times L \times \Delta T = 1.15 \times 10^{-5} \times 18 \times 70 = 14.5 \text{ mm (barre de 18 m, } \Delta T = 70^\circ\text{C)}.$$

6. Stockage des Rails et des Traverses sur Chantier :

6.1 Stockage des Rails :

Le stockage des rails UIC 60 sur le chantier de la ligne Béchar–Gara Djebilet obéit à des règles strictes pour éviter toute déformation permanente, corrosion ou endommagement de la surface

de roulement. Les barres de 18 m ou les longs rails de 108 m sont livrées par train chantier et stockées en parc d'approvisionnement.

- Appuis : les rails doivent reposer sur au minimum 5 points d'appui par barre de 18 m, espacés de 3 à 4 m, pour éviter la déflexion sous poids propre (flèche admissible ≤ 5 mm).
- Supports : supports métalliques caoutchoutés, jamais sur le sol directement.
- Hauteur de gerbage : maximum 1,20 m (3 à 4 couches) avec cales d'espacement entre couches.
- Protection contre la corrosion : les rails sont livrés huilés en usine ; sur le parc, protection complémentaire par bâche ou hangar en cas de stockage > 3 mois.
- Ségrégation : rails UIC 60 séparés des autres profils (UIC 54, rails de grue) avec marquage clair de chaque lot.
- Accès : dégagement de 1,5 m de chaque côté pour passage de la grue ou du pont roulant de déchargement.
- Traçabilité : chaque barre porte un marquage laminé (coulée, lot, profil, nuance, date) et un numéro de réception vérifié à l'arrivée.

Tableau 69 Règles de stockage des rails UIC 60 sur chantier ferroviaire

Critère	Prescription	Norme/Référence
Nombre d'appuis / 18m	≥ 5 appuis (espac. 3–4m)	UIC 860 / SNTF
Type de support	Bois 120×120mm ou métal caoutchouté	ANESRIF
Hauteur de gerbage max.	1,20 m (3–4 couches)	Consigne chantier
Flèche admissible	≤ 5 mm sous poids propre	UIC 860
Durée max. sans protection	3 mois (huile usine)	SNTF
Protection anti-corrosion	Bâche ou hangar si > 3 mois	SNTF
Ségrégation des lots	Obligatoire + marquage lot	EN 13674-1
Accès manutention	1,5 m dégagement latéral	SNTF/SNTP



Figure 50 : Inspection Technique Et Contrôle Qualité Des Rails Uic 60 Sur Le Parc De Stockage



Figure 51 Boulons D'assemblage (Type Haute Résistance) Utilisés Pour La Fixation Mécanique Des Composants De La Voie

6.2 Stockage des Traverses Bi-Bloc :

Les traverses bi-bloc béton précontraint (250 kg unitaire) sont livrées par camion ou wagon plat et stockées en parc intermédiaire avant mise en place sur le chantier. Leur stockage respecte les règles suivantes :

- Gerbage vertical : les traverses sont stockées à plat (face supérieure vers le haut), en gerbes de 5 couches maximum (hauteur $\leq 1,25$ m).
- Cales d'espacement : calage bois entre chaque couche, en alignement avec les blocs, pour éviter le contact béton sur béton et la fissuration.
- Séparation des entretoisements : l'entretoise métallique ne doit pas supporter le poids des traverses supérieures (appui sur les blocs béton uniquement).
- Pente du sol : le sol du parc doit être drainé (pente $\geq 1\%$) pour éviter la stagnation d'eau au contact du béton.
- Protection des semelles : les semelles élastomère préinstallées sont protégées par film plastique jusqu'à la pose ; les attaches Pandrol sont stockées séparément en caisse.
- Traçabilité : chaque lot de traverses est accompagné de sa fiche de contrôle usine (résistance béton, précontrainte, essais EN 13230) et marqué par couleur de lot.
- Manutention : élingage interdit directement sur les fils de précontrainte ; utiliser des sangles textiles larges (≥ 75 mm) sous les blocs.



Figure 52 Transport et livraison ferroviaire de traverses en béton bi-bloc sur le site du projet

Tableau 70 Règles de stockage des traverses bi-bloc béton précontraint

Critère	Prescription	Norme/Référence
Gerbage	≤ 5 couches ($H \leq 1,25$ m)	EN 13230 / SNTF
Cales entre couches	Bois, alignées sur les blocs	ANESRIF
Contact béton/béton	Interdit – cale obligatoire	EN 13230-2

Drainage du sol	Pente $\geq 1\%$ – pas d'eau stagnante	Consigne chantier
Protection semelles	Film plastique jusqu'à la pose	SNTF
Manutention	Sangles textiles $\geq 75\text{mm}$ sous blocs	SNTF/SNTP
Élingage précontrainte	Interdit sur fils précontrainte	EN 13230-2
Fiche de contrôle	Obligatoire par lot (EN 13230)	EN 13230-2

7. ESSAIS DE CONTRÔLE QUALITÉ – RAILS ET TRAVERSES :

7.1 Essais sur les Rails :

Chaque lot de rails UIC 60 livré sur le chantier de Gara Djebilet fait l'objet d'essais de réception systématiques, conformément à la norme EN 13674-1 et aux prescriptions ANESRIF. Ces essais comprennent des contrôles dimensionnels, mécaniques et métallurgiques.

Tableau 71 Programme d'essais de réception des rails UIC 60 – EN 13674-1

Type d'essai	Méthode	Fréquence	Valeur requise	Résultat type
Masse linéique (pesée)	Balance de précision	1/lot (10 barres)	$60,21 \pm 0,5 \text{ kg/m}$	$60,18 \text{ kg/m} \checkmark$
Dimensions (métrologie)	Jauge + pied à coulisse	5/lot	Tol. EN 13674-1	Conforme $\checkmark$
Dureté Brinell (HB)	Brinell/Rockwell	3 points/barre	260–300 HB	275 HB $\checkmark$
Essai de traction	Machine universelle	1 éprouvette/coulée	$R_e \geq 880$, $R_m \geq 1080 \text{ MPa}$	$R_e = 920$, $R_m = 1110 \checkmark$
Résilience KV (-20°C)	Charpy	3 éprouv./coulée	$\geq 10 \text{ J}$	$12 \text{ J} \checkmark$
Composition chimique	Spectromètre	1/coulée	$C \leq 0,82\%$, $Mn \leq 1,30\%$	Conforme $\checkmark$
Contrôle US (ultrasons)	Ultrason intégral	100% des barres	Absence défaut	0 défaut $\checkmark$
Rectitude (flèche)	Règle 1m + comparateur	1/10 barres	$\leq 1 \text{ mm/m}$	$0,4 \text{ mm/m} \checkmark$
Essai de choc (drop test)	Mouton de Charpy	1/coulée	Sans rupture	Conforme $\checkmark$

État de surface	Visuel + loupe ×10	100%	Sans défaut réducteur	Conforme ✓
-----------------	--------------------	------	-----------------------	------------

7.2 Essais de Pesée (Balance) :

La pesée des rails constitue un essai de réception essentiel, effectué sur une balance de précision de portée $\geq 2\ 000$ kg et de classe III. Pour chaque lot livré, 10% des barres (au minimum 3 barres) sont pesées individuellement. La masse linéique est calculée par : $m = \frac{M_{barre}}{L_{barre}}$ (kg/m).

La tolérance admissible est $\pm 0,5\%$ de la masse nominale (60,21 kg/m), soit 59,91 à 60,51 kg/m.

Procédure de pesée sur chantier Gara Djebilet :

- Identification de la barre : lecture du marquage laminé (numéro de coulée, profil, nuance, date).
- Étalonnage de la balance : vérification avec masse étalon avant chaque séquence de pesée.
- Pesée brute : placement de la barre sur la balance par pont roulant ou grue mobile.
- Mesure de la longueur : à la règle métrologique certifiée, correction de la longueur nominale.
- Calcul de la masse linéique : $m = M / L$, comparaison à la valeur nominale 60,21 kg/m.
- Enregistrement : report sur fiche de réception signée par le métreur de l'entreprise et le représentant du maître d'œuvre.



Figure 54 : Parc de stockage industriel de traverses en béton précontraint sur site de préfabrication

7.3 Essais sur les Traverses :

Tableau 72 Programme d'essais de réception des traverses bi-bloc – EN 13230-2

Type d'essai	Méthode	Fréquence	Valeur requise
Résistance béton (compression)	Cube 150mm à 28j	3 cubes/gâchée	$\geq C45/55$ (≥ 45 MPa)
Moment de rupture (-)	Essai de flexion	1/50 traverses	≥ 35 kN·m
Moment de fissuration (+)	Essai de flexion	1/50 traverses	≥ 18 kN·m
Charge transversale (raideur)	Machine horizontale	1/50 traverses	≥ 150 kN/mm
Résistance à l'arrachement	Traction directe attache	1/50 traverses	≥ 25 kN
Dimensions (métrologie)	Pied à coulisse + règle	5/lot	Tolér. EN 13230-2
Enrobage armatures (US)	Ferrosan	1/20 traverses	≥ 20 mm
Aspect visuel béton	Visuel + plan de classer	100%	Classe 2 EN 13230

8. Soudage des Rails – Technique LRS :

La mise en œuvre des Longs Rails Soudés (LRS) sur la ligne Béchar–Gara Djebilet implique deux types de soudures : la soudure aluminothermique réalisée in situ (sur le chantier de pose) et la soudure électrique par étincelage (flash-buttwelding) réalisée en atelier mobile sur train soudeur.



Figure 55 :Opération De Soudure Aluminothermique Réalisée In Situ Sur Voie

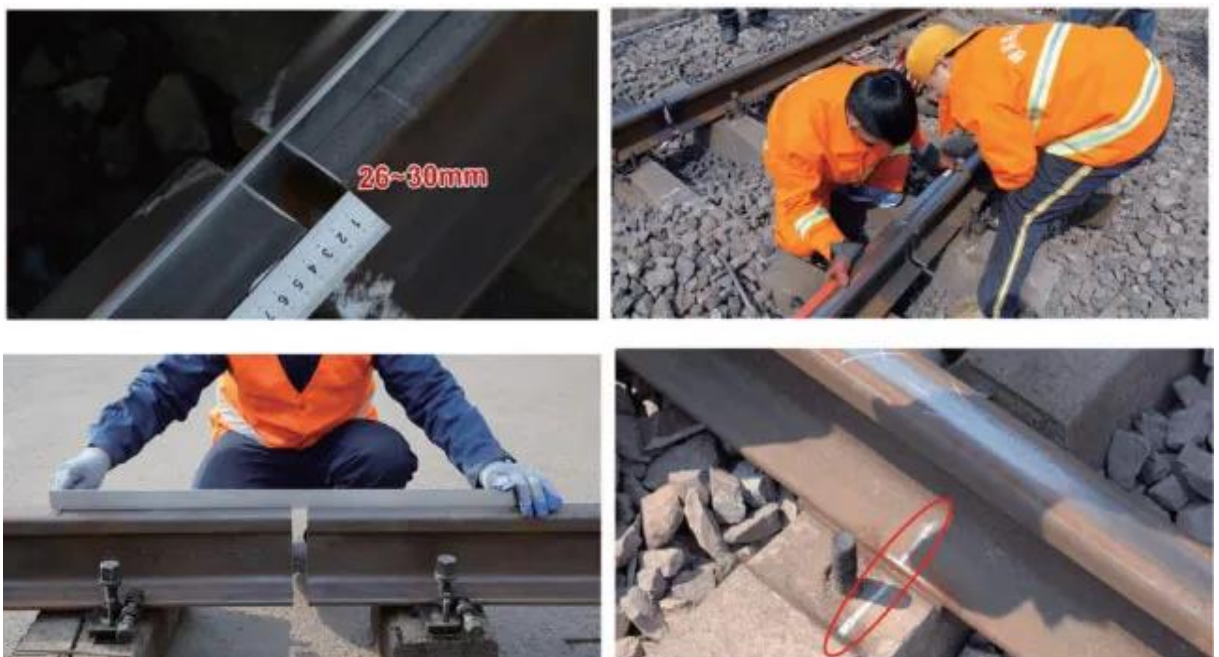


Figure 56 Contrôle Dimensionnel De L'écartement Et Alignement Des Rails Pour La Soudure

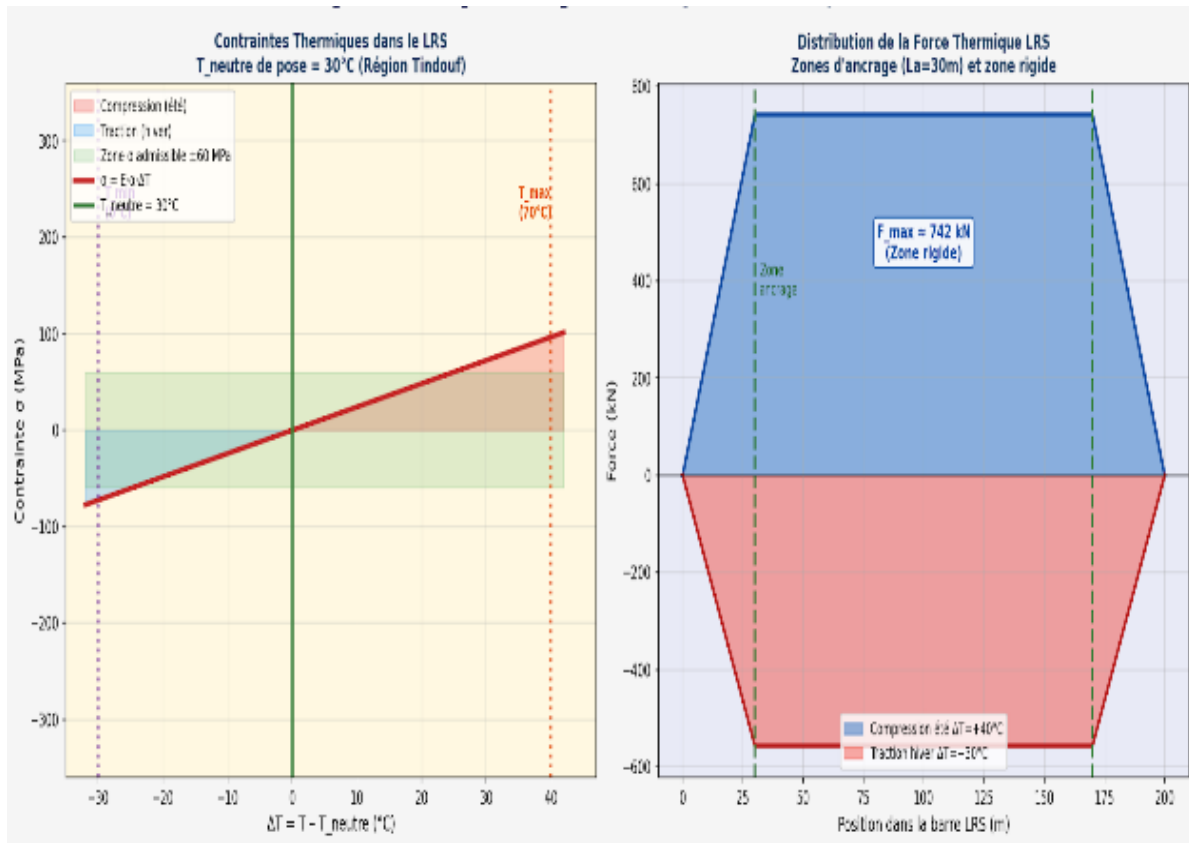


Figure 57 Contraintes thermiques et force longitudinale

8.1 Soudure Aluminothermique (in situ) :

La soudure aluminothermique (procédé Thermit®) est utilisée pour relier les barres de 108 m entre elles sur le chantier, à la température neutre $T_n = 30^\circ\text{C}$. Le principe repose sur la réaction exothermique : $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{Al} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 2 \text{Fe} + 850 \text{ kJ}$, produisant de l'acier en fusion à environ $2\,500^\circ\text{C}$ qui comble le jeu entre les deux extrémités de rail.

Procédure de soudure aluminothermique :

- Préparation des extrémités : meulage des faces de coupe, vérification de la perpendicularité (écart $\leq 0,3 \text{ mm/m}$), nettoyage à l'alcool.
- Mise en place du gabarit et du moule réfractaire autour du joint.
- Préchauffage au chalumeau propane-oxygène à $900\text{--}1\,000^\circ\text{C}$ pendant 2 à 3 min.
- Coulée de la charge aluminothermique (creuset à usage unique, masse 6–10 kg selon profil).
- Durée de solidification : 3 à 5 minutes avant démoulage.
- Ébarbage, meulage et finition de la surface de roulement à la meuleuse angulaire.

- Contrôle dimensionnel : flèche résiduelle $\leq 0,3$ mm sur réglette de 1 m ; contrôle par ultrasons de la zone soudée.
- Délai avant mise en circulation : ≥ 2 heures (refroidissement et contrôle).



Figure 58 Dispositif De Soudure Aluminothermique (Procédé Thermit®) En Cours D'opération Sur Le Chantier De Voie

8.2 Soudure par Étincelage (Flash-Butt Welding) :

La soudure par étincelage (SFE) est réalisée par le train soudeur (atelier mobile sur wagons) pour assembler les barres de 18 m en LRS de 108 m avant leur pose en voie. C'est la technique la plus fiable (taux de rejet < 0,1%) et la plus productive (jusqu'à 25 soudures/heure).

- Principe : passage d'un courant électrique intense (≥ 80 kA) entre les deux extrémités en contact provoque un arc électrique (étincelage) qui chauffe les faces à 1 200–1 400°C, puis application d'un effort de forgeage de 200 à 500 kN rapprochant les deux extrémités.
- Contrôle : chaque soudure est contrôlée par ultrasons (EU) intégralement. Rejet si défaut > 2 mm².
- Avantage par rapport à l'aluminothermique : microstructure plus homogène, HAZ (zone affectée thermiquement) réduite, résistance à la fatigue supérieure.



Figure 59 Joint De Soudure Par Étincelage (Flash-Butt Welding) En Phase De Refroidissement Initial Sur Voie

Tableau 73 Comparaison des procédés de soudage des rails

Critère	Soudure Aluminothermique	Soudure par Étincelage (SFE)
Lieu de réalisation	In situ (chantier)	Atelier / train soudeur
Température de soudage	≈ 2 500°C (acier fondu)	1 200–1 400°C (forgeage)
Durée par joint	15–25 min	2–4 min
Productivité	2–4 joints/h	15–25 joints/h
Taux de rejet	1–3 %	< 0,1 %
Contrôle US systématique	Oui (après meulage)	Oui (intégré)
Application principale	Joints en voie posée	Assemblage LRS en atelier
T° de soudage imposée	T _n = 30°C ± 3°C	Indépendante de T°
Norme de référence	UIC 721 R	EN ISO 14587

9. BORNAGE DES TRAVERSES :

Le bornage des traverses est l'opération de positionnement précis et d'implantation de chaque traverse sur le lit de ballast, avant la pose des rails. Cette opération garantit le respect de l'espacement nominal de 600 mm (1 667 traverses/km) et l'alignement perpendiculaire à l'axe de la voie.

9.1 Procédure de Bornage :

- Matérialisation de l'axe de la voie : l'axe théorique est matérialisé au sol par des piquets topographiques espacés de 20 à 50 m, implantés par le géomètre du chantier à partir des points de contrôle.
- Tracé de l'axe : un cordeau tendu entre les piquets définit l'axe de pose sur une longueur de chantier.
- Marquage de l'espacement : à partir d'un point d'origine (PK connu), les positions des traverses sont marquées sur le lit de ballast à la craie ou au spray, tous les 600 mm (±5 mm de tolérance).

- Vérification de la perpendicularité : chaque marque de traverse est contrôlée à l'équerre (angle $90^\circ \pm 1^\circ$ avec l'axe).
- Pose des traverses : les traverses sont déposées mécaniquement (bras distributeur du train de pose ou grue légère) sur les marques.
- Contrôle de l'écartement : avant la pose des rails, l'écartement entre traverse et traverse est vérifié à la règle métallique graduée.
- Ajustement : toute traverse hors tolérance ($> \pm 5$ mm) est repositionnée manuellement ou mécaniquement avant le clavetage des rails.

9.2 Tolérances de Bornage

Tableau 74 Tolérances de bornage des traverses – Réception de voie

Paramètre	Tolérance admissible	Méthode de contrôle
Espacement longitudinal	600 ± 5 mm	Règle + laser
Perpendicularité à l'axe	$90^\circ \pm 1^\circ$	Équerre + théodolite
Nivellement transversal ($\pm$)	± 5 mm	Niveau à bulle + règle
Alignement longitudinal	≤ 5 mm / 10 m de corde	Règle + comparateur
Position par rapport à l'axe	0 ± 10 mm (axe symétrique)	Mesure directe

10. ASSEMBLAGE, ÉQUILIBRAGE ET MISE EN SERVICE DE LA VOIE :

L'assemblage final de la voie et son équilibrage constituent les opérations conclusives avant la réception technique et la mise en service commerciale. Ces opérations garantissent la conformité géométrique et mécanique de la voie aux normes SNTF/ANESRIF.



Figure 60 Chantier D'assemblage Final De La Voie Ferrée (Pose Des Traverses Et Rails En Présence De L'équipe De Supervision Et D'un Engin De Terrassement)

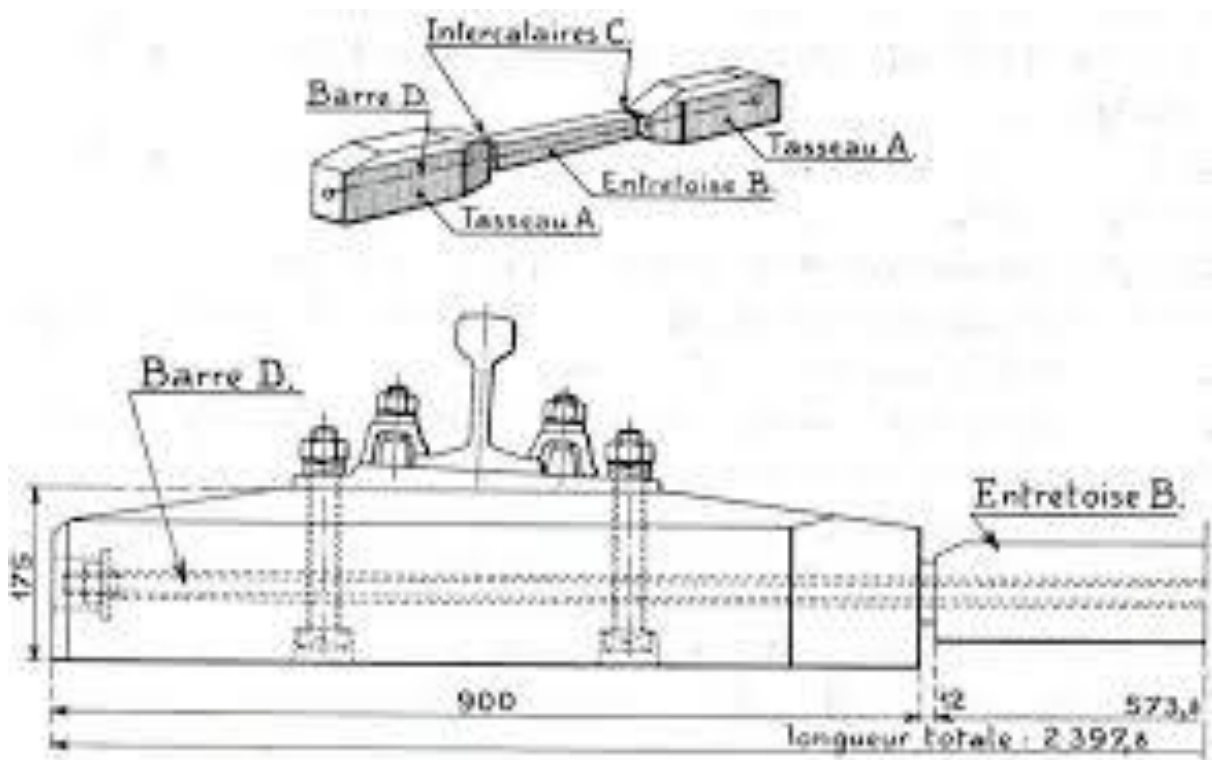


Figure 61 Schéma Technique Détaillé De L'assemblage D'une Traverse Bi-Bloc Avec Entretoise Et Barre De Liaison

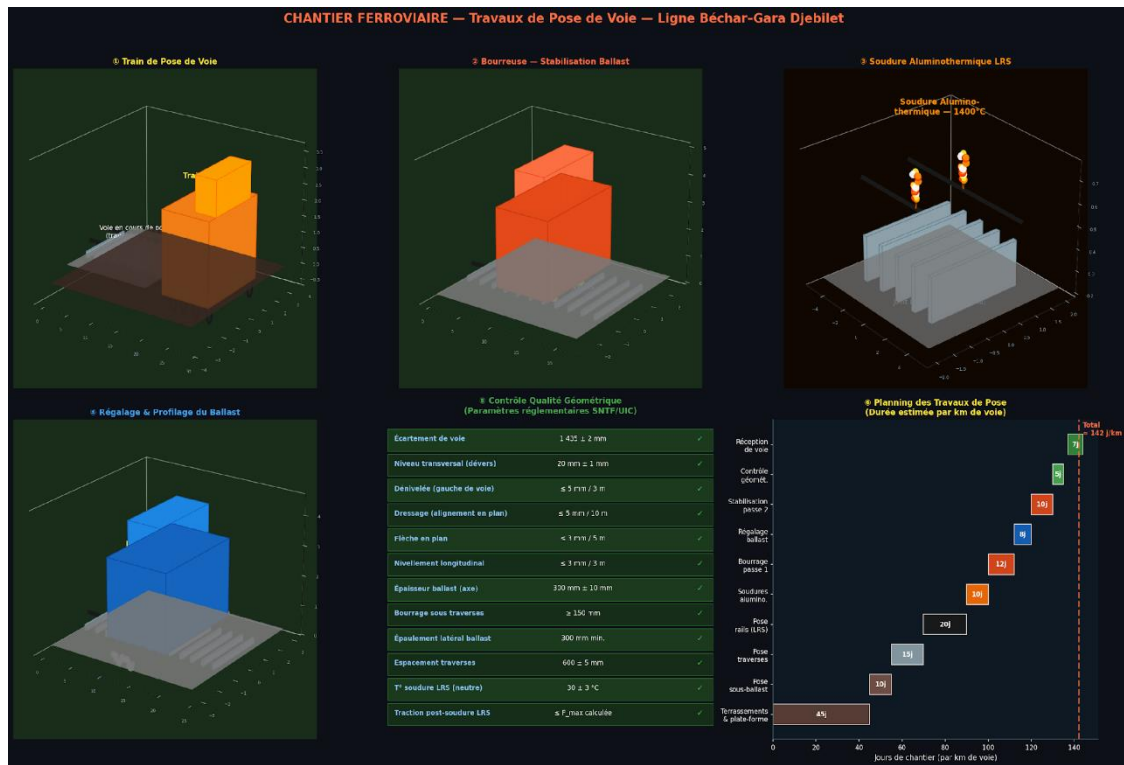


Figure 62 : Tableau De Bord Du Chantier Ferroviaire – Travaux De Pose De Voie – Ligne Béchar-Gara Djebilet

10.1 Séquence d'Assemblage de la Voie :

Tableau 75 : Séquence des opérations de pose et d'assemblage – Ligne Béchar–Gara Djebilet

Phase	Opération	Engin/Outil	Durée/km	Contrôle
①	Terrassements + plateforme	Niveleuse + compacteur	45 j	EV2 ≥ 80 MPa
②	Pose sous-ballast (0/31.5)	Bulldozer + régaleur	10 j	Épaisseur 200mm
③	Bornage + pose traverses	Train de pose + grue	15 j	e=600±5mm
④	Pose des rails LRS (108m)	Train porte-rails	20 j	Alignement ±5mm
⑤	Soudures aluminothermiques	Équipe de soudeurs	10 j	Ultrasons 100%
⑥	Clavetage des attaches Pandrol	Manuel + clé dynamo.	8 j	Couple 350 N·m
⑦	Régalage ballast (1ère passe)	Régaleuse automatique	8 j	Profil réglementaire
⑧	Bourrage (1ère passe)	Bourreuse P&T 09-3X	12 j	Géomét. après bourrage

⑨	Stabilisation dynamique	Stabilisateur DVT	5 j	Rés. ballast ≥ 8 kN
⑩	Bourrage (2ème passe)	Bourreuse P&T 09-3X	10 j	Géomét. finale
⑪	Contrôle géométrique final	Voiture de mesure	5 j	Paramètres UIC
⑫	Réception et mise en service	Inspection ANESRIF	7 j	PV de réception

10.2 Opération d'Équilibrage (LRS – Mise à la T° Neutre) :

L'équilibrage du LRS est l'opération la plus délicate de la mise en œuvre de la voie. Elle consiste à mettre le rail dans un état de contrainte nulle (ou contrôlée) à la température neutre de pose $T_n = 30^\circ\text{C}$, pour que les contraintes thermiques restent dans les limites admissibles quelle que soit la température en service (0°C à 70°C pour le site de Tindouf).

- Mesure de la température du rail : thermomètre à contact (précision $\pm 0,5^\circ\text{C}$) posé à 3 points de la barre au soleil, à l'ombre et au milieu. La T° est la moyenne des 3 mesures.
- Cas $T_{rail} = T_n \pm 3^\circ\text{C}$: libération directe des attaches sur 200 m de part et d'autre du joint, puis re-clavetage sans traction ni compression.
- Cas $T_{rail} = T_n > 3^\circ\text{C}$: le rail est en traction latente. Il faut appliquer une force de traction par vérins hydrauliques (effort $F = E \times \alpha \times A \times (T_n - T_{rail}) = (210000 \times 1.15 \times 10^{-5} \times 76.86 \times \Delta T)$ pour allonger le rail, puis clavetage et relâchement des vérins.
- Cas $T_{rail} > T_n$ (été, $T > 33^\circ\text{C}$) : opération interdite en pleine chaleur. Reporter à la période fraîche (nuit ou petit matin).
- Contrôle final : mesure de la longueur libre entre repères peints, comparaison à la longueur théorique à T_n

Tableau 76 Paramètres d'équilibrage LRS – Chantier Gara Djebilet

Paramètre	Valeur	Unité	Commentaire
T° neutre de pose T_n	30	$^\circ\text{C}$	Région Tindouf – UIC 720 R
Tolérance T° lors de pose	± 3	$^\circ\text{C}$	$T_{rail} = 27$ à 33°C
T° minimale site	0	$^\circ\text{C}$	Hiver Tindouf (nuits)
T° maximale rail	70	$^\circ\text{C}$	Rail exposé soleil (été)

ΔT compression max (été)	+40	°C	$T_{\text{max}} - T_{\text{n}} = 70-30$
ΔT traction max (hiver)	-30	°C	$T_{\text{min}} - T_{\text{n}} = 0-30$
σ_{th} max été	96,6	MPa	$E \times \alpha \times 40 < 120 \text{ MPa} \checkmark$
σ_{th} max hiver	72,5	MPa	$E \times \alpha \times 30 < 120 \text{ MPa} \checkmark$
Force de traction LRS (hiver)	787	kN	$E \times \alpha \times A \times 30$ (par rail)
Longueur zone d'ancrage	25	m	De part et d'autre joint

11. RÉCAPITULATIF DE LA SUPERSTRUCTURE RETENUE :

Le tableau ci-après synthétise l'ensemble des composants et spécifications de la superstructure de voie ballastée retenue pour la ligne Béchar–Gara Djebilet, tronçon N°04 :

Tableau 77 Fiche technique complète de la superstructure – Ligne Béchar–Gara Djebilet

Composant	Spécification	Norme	Vérification
Rail	UIC 60 (60 E1) – 60,21 kg/m	EN 13674-1	$\sigma_{\text{r}}=235<360 \text{ MPa} \checkmark$
Nuance acier rail	R260 – $R_m \geq 1\,080 \text{ MPa}$	EN 13674-1	Essai traction $\checkmark$
Type de voie	LRS – 108 m par barre	UIC 720 R	$T_{\text{n}}=30^\circ\text{C} \checkmark$
Traverse	Bi-bloc béton précontraint B60	EN 13230-2	$Q=26,9<250 \text{ kN} \checkmark$
Espacement traverses	600 mm – 1 667 tr./km	SNTF	Bornage $\pm 5\text{mm} \checkmark$
Attache	Pandrol SKL14	EN 13481	14 kN/attache $\checkmark$
Semelle sous-rail	Élastomère 165×145×10mm	EN 13481	Raideur OK $\checkmark$
Ballast	Granite 25/50mm – Classe F1	EN 13450	$LA=9\%<12\% \checkmark$
Épaisseur ballast	300 mm (axe)	UIC 719 R	$\sigma_{\text{pf}}=8,7<150 \text{ kPa} \checkmark$
Sous-ballast	Grave 0/31.5 – e=200mm	SNTF	Filtre OK $\checkmark$
Écartement voie	1 435 mm (standard UIC)	UIC	Bornage $\checkmark$
Soudage	Aluminothermique + SFE	UIC 721R/EN ISO 14587	US 100% $\checkmark$
T° neutre LRS	30 °C (Tindouf)	UIC 720 R	$\sigma_{\text{th}}<120 \text{ MPa} \checkmark$

12. Conclusion

Ce chapitre met en évidence que le choix de la voie ballastée pour le projet Béchar–Gara Djebilet est le fruit d'une analyse technique rigoureuse, parfaitement adaptée aux contraintes extrêmes du milieu saharien. En s'appuyant sur des standards internationaux tels que les normes EN et UIC, ainsi que sur les prescriptions de l'ANESRIF, cette solution garantit une infrastructure capable de supporter en toute sécurité des charges axiales massives de 32,5 tonnes. La robustesse de cet ensemble repose sur l'utilisation stratégique du rail UIC 60 et de la traverse bi-bloc en béton précontraint, des composants dont la fiabilité a été validée par un programme complet d'essais de réception et de contrôle qualité en usine comme sur chantier. La mise en œuvre des Longs Rails Soudés (LRS) constitue le pivot technique de cette superstructure, permettant une continuité structurelle qui minimise les chocs dynamiques et réduit considérablement les besoins en maintenance. L'articulation efficace entre la soudure électrique par étincelage, réalisée en atelier mobile pour une productivité optimale, et la soudure aluminothermique in situ pour la fermeture des voies, démontre une maîtrise industrielle de haut niveau. Cette approche, couplée à une préparation minutieuse des couches d'assise — ballast en granite et sous-ballast drainant — assure une transmission optimale des charges vers la plateforme, garantissant ainsi la stabilité géométrique de la voie face aux amplitudes thermiques sévères du désert.

Enfin, la rigueur appliquée aux phases de bornage topographique et d'équilibrage thermique à 30°C souligne l'importance des procédures de contrôle pour prévenir tout risque de flambement des rails sous l'effet de la chaleur. En conclusion, l'assemblage final de la voie, orchestré par une séquence opératoire normée, transforme ces matériaux bruts en une artère vitale et pérenne. Cette infrastructure ne représente pas seulement une prouesse d'ingénierie ferroviaire en zone aride ; elle constitue le socle fondamental d'un développement économique majeur, capable de répondre avec résilience aux exigences intensives du transport de minerai sur le long terme.

L'étude de la structure de la voie du tronçon N°04 de la ligne Béchar–Gara Djebilet a conduit à la définition d'une superstructure ferroviaire complète et cohérente, optimisée pour les conditions spécifiques du projet : trafic mixte voyageurs/minerai lourd, climat saharien extrême (0 à 70°C) et ressources locales disponibles.

Les choix techniques retenus – rail UIC 60 en LRS ($T_{\text{neutre}} = 30^{\circ}\text{C}$), traverses bi-bloc béton précontraint ($e = 600 \text{ mm}$), ballast granite 25/50 mm Classe F1, attaches Pandrol SKL14 – répondent à l'ensemble des exigences normatives (EN 13674-1, EN 13230-2, EN 13450, UIC

719 R, UIC 720 R, ANESRIF/SNTF) et ont été vérifiés par le calcul (modèle de Winkler) et par les essais de réception.

Les procédures de stockage, de soudage, de bornage et d'équilibrage détaillées dans ce chapitre constituent le référentiel d'exécution que l'entreprise SNTP devra respecter tout au long du chantier de pose de voie, sous le contrôle du maître d'œuvre SETO et la supervision de l'ANESRIF.

L'étude de la structure de la voie du tronçon N°04 de la ligne ferroviaire Gara Djebilet – Béchar a permis de définir une superstructure ferroviaire adaptée aux conditions d'exploitation du projet, notamment le transport de minerai lourd avec une charge à l'essieu de 32,5 tonnes et les contraintes climatiques sahariennes.

Conclusion Générale

Conclusion Générale et Perspectives

Le projet de réalisation de la ligne ferroviaire Gara Djebilet – Béchar représente un défi d'ingénierie majeur, marqué par la convergence de contraintes naturelles extrêmes et d'exigences d'exploitation industrielle de haute performance. Ce mémoire a eu pour objectif d'analyser, de concevoir et de valider les solutions techniques permettant d'assurer la pérennité et la sécurité de cette infrastructure stratégique, dimensionnée pour le transport minéralier lourd (32,5 tonnes par essieu).

Les travaux présentés dans ce document ont suivi une approche méthodique structurée en quatre axes fondamentaux :

1. L'intégration environnementale et géotechnique : L'étude a démontré que, malgré les conditions arides du désert algérien, la caractérisation précise des sols (classification QS3) et l'analyse des risques (inondations, ensablement) ont permis de définir des assises de plateforme robustes et durables, conformes aux standards internationaux (GTR).
2. Le dimensionnement structurel de la plateforme : Le choix d'une plateforme de type P3, dotée d'une structure multicouche optimisée (ballast, sous-ballast, couche de fondation et couche de forme), garantit une répartition efficace des contraintes dynamiques, assurant ainsi la stabilité mécanique de l'ouvrage face aux sollicitations intenses du trafic minéralier.
3. L'excellence de la superstructure ferroviaire : La sélection du rail UIC 60, posé en Longs Rails Soudés (LRS) avec une température neutre de 30°C, associée aux traverses en béton bi-bloc précontraint, constitue le cœur technologique du projet. L'analyse comparative menée a confirmé que cette configuration est la solution la plus adaptée, alliant durabilité, performance géométrique et efficacité économique.
4. La maîtrise opératoire et le contrôle qualité : La définition des protocoles de soudage (aluminothermique et électrique par étincelage), des méthodes de bornage et des essais de réception rigoureux (essais mécaniques, métallurgiques et US) assure que chaque composant mis en œuvre respecte les normes de sécurité les plus strictes (EN, UIC, ANESRIF).

En conclusion, ce mémoire a démontré la faisabilité technique et la viabilité structurelle du tronçon PK 736 – PK 750. La synergie entre des matériaux locaux de qualité (granite de

Béchar), une ingénierie de précision et le strict respect des protocoles de mise en œuvre fait de cet ouvrage une artère vitale résiliente.

Au-delà de la prouesse technique, cette infrastructure constitue un levier de développement économique majeur pour l'Algérie. Par sa conception rigoureuse, elle répond avec succès aux exigences de la logistique minière moderne tout en s'inscrivant durablement dans le paysage aride du Sud algérien. Les résultats de cette étude serviront de référentiel technique pour les équipes de réalisation sur le terrain, assurant ainsi la réussite de ce projet ferroviaire d'envergure nationale.

Ce mémoire a permis de mener une étude technique approfondie des cinq chapitres du projet de construction de la ligne ferroviaire Béchar — Gara Djebilet, l'un des projets ferroviaires les plus importants jamais entrepris en Algérie.

Le premier chapitre a établi une description complète et rigoureuse du projet, couvrant tous ses aspects géographiques, techniques et réglementaires. L'analyse des données de base — topographiques, géotechniques, hydrologiques et climatiques — a mis en évidence la complexité du contexte saharien et la nécessité d'adapter les solutions techniques aux spécificités de ce milieu extrême. Le choix d'une voie normale à 1 435 mm avec des rails UIC 60 et une vitesse de référence de 120 km/h apparaît comme la solution la plus équilibrée pour répondre simultanément aux exigences du trafic fret lourd et du trafic voyageurs.

Le second chapitre a démontré que la demande de trafic, dominée par l'exploitation du gisement de Gara Djebilet, est suffisamment importante pour justifier pleinement cet investissement colossal. Les prévisions de trafic montrent une montée en puissance progressive, de 15 millions de tonnes par an en Phase 1 à 50 millions de tonnes à l'horizon 2050. La capacité calculée de la ligne (jusqu'à 40 trains par jour en phase mature) est amplement suffisante pour absorber ces volumes, tout en garantissant une qualité de service satisfaisante pour les voyageurs.

En perspective, les perspectives futures de ce travail portent sur le développement d'un système de maintenance prédictive basé sur l'intelligence artificielle, l'optimisation énergétique de la traction et l'intégration de ce projet dans le réseau ferroviaire trans-africain à l'horizon 2050.

La réalisation de cette ligne ferroviaire représente bien plus qu'un simple projet d'infrastructure : elle constitue un acte de foi dans le potentiel économique du Grand Sud algérien et une contribution majeure à la diversification de l'économie nationale au-delà des hydrocarbures.

Références Bibliographiques

- [1] ANESRIF (2022). Rapport technique du projet de la ligne ferroviaire Béchar — Tindouf. Agence Nationale d'Études et de Suivi de la Réalisation des Investissements Ferroviaires, Alger.
- [2] Ministère des Transports (2020). Programme National de Développement des Infrastructures Ferroviaires 2020-2035. Direction Générale des Infrastructures Ferroviaires, Alger.
- [3] UIC (2020). Leaflet UIC 719 R — Earthworks and Track Bed for Railway Lines. Union Internationale des Chemins de Fer, Paris.
- [4] UIC (2018). Leaflet UIC 720 R — Laying and maintenance of CWR track. Union Internationale des Chemins de Fer, Paris.
- [5] EN 13674-1 (2017). Railway applications — Track — Rail. European Standard, Brussels.
- [6] EN 13230-2 (2016). Railway applications — Track — Concrete sleepers and bearers. European Standard, Brussels.
- [7] Faure, R. & Leuridan, J. (2019). Dimensionnement des voies ferrées — Méthodes et applications. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [8] Ministère de l'Industrie et des Mines (2021). Projet Gara Djebilet — Étude de faisabilité de l'exploitation du gisement de fer. Alger.
- [9] Boumediene, K. (2018). Étude géotechnique des sols sahariens pour les projets ferroviaires. Revue Algérienne de Géotechnique, Vol. 8, N°3, pp. 45-62.
- [10] SNCF Réseau (2018). Référentiel IN 2728 — Conception des lignes nouvelles. Direction de l'Ingénierie, Paris.
- [11] ONM — Office National de la Météorologie (2022). Données climatiques de la région Sud-Ouest algérien (Béchar — Tindouf). Alger.
- [12] ANRH — Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (2021). Études hydrologiques de la région de Béchar et Tindouf. Alger.