

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

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية فرنسيس جاتسون

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics Francis

Jeanson



Mémoire :

Pour l'obtention du diplôme ingénieur d'Etat

Filière : Travaux publics

**Spécialité : Infrastructure de base et Matériaux de
structure**

Thème :

Etude de ligne ferroviaire AINSALAH Tamenrasset du PK410+500 au
PK427+329 avec un gare de MOULAY LAHCEN PK418+200

Présenté par :

Bouchater Chemseddine
Benarib Mounir

Encadré par :

Mr. GHAFAR Karam Allah

Promotion 2025/2026

REMERCIEMENTS

Au premier lieu, nous tenons à remercier Dieu qui nous a donné le courage et la volonté pour terminer ce travail.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur, Mr Ghaffar Karam Allah, pour sa disponibilité permanente, pour son aide précieuse, ses conseils avisés et ses orientations tout au long de ce projet.

Nous remercions chaleureusement tous les enseignants et le personnel de l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics.

Nous aimons exprimer notre gratitude au service de scolarité DIB, en particulier Mme Makoudi et Mme Mehdiya, ainsi qu'au service DMS, en particulier Mme Amina, et tout le personnel de l'ENSTP pour leur soutien et leur accueil.

Que tous ceux ou celles qui nous ont apporté leur soutien et qui nous ont aidés de loin ou de près pour l'achèvement de ce projet trouvent ici l'expression de notre vive et sincère reconnaissance, en particulier nos parents, nos familles et nos amis.

DEDICACE

Au nom d'ALLAH, le très Miséricordieux. Je remercie ALLAH le tout Puissant, clément et Miséricordieux de m'avoir motivé à réaliser ce modeste travail, ensuite je remercie infiniment mes parents, qui m'ont encouragé et aidé pour arriver à ce stade de formation.

Je souhaite dédier humblement ce travail à **ma très chère mère**, qui a été à mes côtés lors des moments les plus difficiles de mon parcours éducatif. Elle a manifesté une détermination sans faille pour me permettre de surmonter les épreuves de ce monde et trouver ma voie, en m'offrant ses précieux conseils. Grâce à elle, j'ai pu développer mes compétences et rester motivé tout au long de ce périple.

Toutefois, je prie le Miséricordieux, qu'Allah, de lui accorder une récompense bien plus grande que celle que je pourrais lui offrir, car ma gratitude envers elle ne saurait être pleinement exprimée. Et qu'Te protège et Te garde en bonne santé.

Je souhaite dédier ce travail à **mon père**, qui a consacré sa vie pour me voir grandir et réussir dans mon parcours éducatif. Il a toujours été présent à mes côtés lors des moments difficiles de ma vie. Son soutien inconditionnel et sa présence constante ont été des piliers essentiels dans mon cheminement. Je lui suis infiniment reconnaissant pour tous les sacrifices qu'il a consentis pour mon éducation.

À mes chers frères : **Nassim, Raouf, Aymen**, et à mes sœurs **marwa**

À mon binôme et confrère : **Bouchater Chameseddine**.

À mes fidèles amis : **Hsino, Walid, Dhiaa, Wassim** et **Saadou**.

À toute la famille **BENARIB**.

DEDICACE

C'est avec une immense gratitude et un profond respect que je dédie ce modeste travail, avant tout, à l'Omnipotent, **ALLAH** le Tout-Puissant, qui m'a guidé et donné la force d'accomplir ce parcours.

À ma très chère mère, la source de ma tendresse et le secret de ma réussite. Toi qui as toujours prié pour moi dans l'ombre et qui m'as entouré de ton amour inconditionnel durant les moments les plus difficiles. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon affection et ma reconnaissance infinie pour tes sacrifices. Que Dieu te préserve, t'accorde une longue vie et une santé de fer.

À mon cher père, mon modèle et mon premier soutien. Toi qui as tout sacrifié pour me voir grandir et réussir dans mes études, et dont la présence constante a été mon plus grand pilier. Je te suis infiniment reconnaissant pour l'éducation et les valeurs que tu m'as transmises. Que Dieu te garde en bonne santé et te protège.

À mes chers frères et sœurs : **Ikram, Issam, Saad, Oumaima** et **Ousaid**, pour leur présence et leur affection constante.

À mon cher ami, binôme et compagnon de lutte : **Benarib Mounir**, avec qui j'ai partagé les défis et la réussite de ce projet.

À mes chers oncles : **Yazid** et **Hakim**, ainsi qu'à mon cousin, **Anis** pour leur soutien familial précieux.

À toute la famille **BOUCHATER**.

RESUME

Le présent projet consiste essentiellement à l'étude d'avant-projet détaillé (A.P.D) d'un tronçon de la nouvelle ligne ferroviaire dans le Grand Sud algérien, situé dans la wilaya de Tamanrasset à proximité de la commune d'Aïn Salah. S'étendant du PK 410+500 au PK 427+329, soit sur un linéaire total de 16,8 Km, notre étude englobe également l'aménagement de la gare de Moulay Lahcen.

L'identification des caractéristiques techniques les plus appropriées de la ligne ferroviaire projetée est basée sur les recommandations ainsi que les pratiques qui sont suivies par la SNTF et les autres systèmes ferroviaires (normes UIC). La modélisation géométrique et la conception globale du projet ont été exécutées à l'aide du logiciel COVADIS.

Mots clés : ligne minière – voie ferrée – déviation ferroviaire – remblai – voie de garage .

ملخص

يتمثل هذا المشروع أساساً في إنجاز الدراسة التفصيلية (A.P.D) لمقطع من خط السكة الحديدية الجديد بالجنوب الكبير الجزائري، الواقع بولاية تمنراست، بالقرب من بلدية عين صالح. يمتد هذا المقطع من النقطة الكيلومترية 410+500 إلى النقطة الكيلومترية 329+426، بطول إجمالي يقدر بـ 16.8 كلم، كما تشمل الدراسة تهيئة محطة مولاي لحسن. وقد تم تحديد الخصائص التقنية المثلى لخط السكة الحديدية المقترح بالاعتماد على التوجيهات والمعايير المعتمدة من طرف الشركة الوطنية للنقل بالسكك الحديدية (SNTF)، إضافة إلى المعايير الدولية المعمول بها في أنظمة السكك الحديدية الحديثة، وعلى رأسها معايير الاتحاد الدولي للسكك الحديدية (UIC) كما تم الاعتماد على برنامج Covadis في النمذجة الهندسية والتصميم الهندسي للمشروع، حيث أتاح إنجاز أعمال الرفع الطبوغرافي، وتصميم المسار الأفقي والعمودي، وإعداد المقاطع الطولية والعرضية، بما يضمن توافق المشروع مع المتطلبات التقنية والمعايير المعتمدة.

الكلمات المفتاحية : خط منجمي، سكة، عارضة، سكة حديدية، تحويل، مصعد، خط جانب .

SUMMARY

This project mainly consists of the detailed design (A.P.D) of a section of the new railway line in the Algerian Grand Sud, located in the wilaya of Tamanrasset near the commune of Aïn Salah. Extending from PK 410+500 to PK 427+329, with a total length of 16.8 Km, our study also includes the development and layout of the Moulay Lahcen station.

The identification of the most appropriate technical specifications for the proposed railway line is based on the recommendations and practices followed by the SNTF and other advanced rail systems (UIC standards). The geometric modeling and the overall design of the project were carried out using COVADIS software.

Keywords : mining railway line – railway track – railway deviation – embankment – siding track .

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES VOIES FERREE	2
I-1- Définition	2
I-2- Description des éléments constitutifs de la voie ferrée	2
I-3- Caractéristiques fondamentales du chemin de fer	2
I-4- Historique du chemin de fer dans le monde	2
I-5- Histoire du chemin de fer en Algérie	3
I-5-1- Le programme de 1857	3
I-5-2- Le programme de 1879	4
I-5-3- Le programme de 1907	5
I-6- Situation du réseau actuel	5
I-6-1- Constitution du réseau	5
I-6-2- Parc du matériel roulant	6
I-6-3- Le trafic ferroviaire	7
I-6-4- Le transport commercial	7
I-6-5- Le transport de voyageurs	7
I-7- Classement des lignes de chemin de fer	8
CHAPITRE II : L'ENSABLEMENT	9
II.1 Introduction	9
II.2 Définition et conséquences de l'ensablement	9
II.3 Mécanismes de l'ensablement	9
II.3.1 Le vent	9
II.3.2 Nature et granulométrie du sol	9
II.3.3 État de la végétation	10
II.4 Modes de transport des particules	10
II.5 Procédés de lutte contre l'ensablement	10
II.5.1 Lutte mécanique	10
II.5.2 Fixation chimique (Technique du Mulch)	11
II.5.3 Fixation biologique	11
II.6 Conclusion	11
CHAPITRE III : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	13

III.1 Introduction.....	13
III.2 Histoire du chemin de fer en Algérie	13
III.3 Réseau ferroviaire algérien actuel	13
III.3.1 Rocade ferroviaire Nord.....	13
III.3.2 Rocade des Hauts Plateaux.....	13
III.3.3 Pénétrantes Sud.....	13
III.4 La ligne Aïn Salah – Tamanrasset dans le contexte national.....	14
III.5 Avantages du transport ferroviaire.....	14
III.6 Normes et références techniques utilisées.....	15
III.7 Conclusion	15
CHAPITRE IV : PRESENTATION DE PROJET.....	16
IV.1 Introduction	16
IV.2 Présentation du site.....	16
IV.2.1 Situation géographique.....	16
IV.2.2 Topographie et relief.....	17
IV.2.3 Géologie.....	17
IV.2.4 Climat.....	17
IV.2.5 Sismicité.....	18
IV.3 Présentation du projet.....	18
IV.4 Caractéristiques du projet	19
IV.4.1 Caractéristiques de base	19
IV.4.2 Caractéristiques de la voie.....	19
IV.5 Description du tracé	20
IV.6 Conclusion	20
CHAPITRE V : SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE	21
V.1 Introduction.....	21
V.2 Le Rail.....	21
V.2.1 Fonction et profil du rail	21
V.2.2 Assemblage des rails – Rail Soudé en Long (RSL).....	21
V.2.3 Inclinaison des rails	22
V.3 Les Traverses	23
V.3.2 Traverses en béton monobloc (type LGV).....	23
V.4 Les Attaches.....	23

V5 Le Ballast.....	25
V6 Caractéristiques de la voie du projet	26
V7 Conclusion	26
CHAPITRE VI : TRACE EN PLAN.....	27
VI.1 Introduction	27
VI.2 Éléments du Tracé en Plan	27
VI.2.1 L'alignement droit	27
VI.2.2 L'arc de cercle.....	27
VI.2.3 La courbe de raccordement (Clothoïde).....	27
VI.3 Paramètres de Base.....	28
VI.4 Formules de Calcul	28
VI.4.1 Dévers pratique d_p	29
VI.4.2 Dévers théorique d_{th}	29
VI.4.3 Insuffisance de dévers I	29
VI.4.4 Excès de dévers E	29
VI.4.5 Longueur minimale de clothoïde.....	30
VI.5 Calcul du Rayon Minimal R_{min}	30
VI.5.1 Formule	30
VI.5.2 Application numérique	30
VI.6 Calculs Détaillés par Courbe.....	31
VI.7 Tableau Récapitulatif des 6 Courbes.....	39
VI.8 Longueurs Minimales des Éléments du Tracé (SNTF §6.1.4.1)	40
VI.9 Conclusion	40
CHAPITRE VII: PROFIL EN LONG.....	42
VII.1 Introduction.....	42
VII.2 Définitions et Éléments du Profil en Long	42
VII.2.1 Les déclivités	42
VII.2.2 Les raccordements verticaux.....	42
VII.3 Paramètres et Normes de Référence	43
VII.3.1 Déclivité maximale admissible (SNTF §6.1.5.1)	43
VII.3.2 Rayon vertical minimal admissible (SNTF §6.1.5.2)	43
VII.3.3 Longueurs minimales (SNTF §6.1.5.3)	44
VII.4 Description Générale du Profil en Long.....	45

VII.5 Calculs Détaillés des Éléments du Profil en Long	46
VII.5.1 Calcul des Déclivités	46
VII.5.2 Calcul des Raccordements Verticaux.....	47
VII.6 Points d'Intersection Verticaux (PIV)	53
VII.7 Tableau Récapitulatif – Éléments du Profil en Long	53
VII.8 Contraintes Spécifiques le long du Tracé.....	55
VII.9 Résumé et Vérification Globale	55
VII.10 Conclusion.....	56
CHAPITRES VIII : ETUDE hydrologique et hydraulique	57
VIII.1 Introduction	57
VIII.2 Objectifs de l'assainissement et du drainage	57
VIII.3 Présentation de la zone d'étude.....	57
VIII.3.1 Situation géographique	57
VIII.3.2 Caractéristiques climatiques	58
VIII.3.2.1 Températures.....	58
VIII.3.2.2 Vents	58
VIII.3.2.3 Pluviométrie	58
VIII.4. Caractéristiques morphologiques des bassins versants	58
VIII.4.1 Définition et délimitation	58
VIII.4.2 Tableau récapitulatif des bassins versants (BV)	59
VIII.5. Étude hydrologique – Calcul des débits de crue.....	64
VIII.5.1 Temps de concentration.....	64
VIII.5.1.1 Formule de Ventura ($S < 5 \text{ km}^2$)	64
VIII.5.1.2 Formule de Passini ($5 \text{ km}^2 \leq S \leq 25 \text{ km}^2$)	64
VIII.5.1.3 Formule de Giandotti ($S > 25 \text{ km}^2$)	64
VIII.5.2 Intensité de pluie	64
VIII.5.3 Coefficient de ruissellement.....	64
VIII.5.4 Méthodes de calcul des débits de crue.....	65
VIII.5.4.1 Méthode Rationnelle ($S \leq 10 \text{ km}^2$)	65
VIII.5.4.2 Méthode de Mallet-Gauthier ($S > 10 \text{ km}^2$)	65
VIII.5.4.3 Méthode de Giandotti (grands bassins versants).....	65
VIII.5.5 Résultats des débits de crue centennaux (Q100).....	65
VIII.6 Étude hydraulique – Dimensionnement des ouvrages.....	68

VIII.6.1 Ouvrages transversaux	68
VIII.6.1.1 Principes de dimensionnement.....	68
VIII.6.1.2 Buses circulaires	69
VIII.6.1.3 Dalots rectangulaires.....	71
VIII.6.2 Ouvrages longitudinaux (fossés)	72
VIII.6.2.1 Rôle et conception	72
VIII.6.2.2 Débit de projet des fossés.....	72
VIII.6.2.3 Dimensionnement hydraulique des fossés	73
VIII.7. Récapitulatif des ouvrages hydrauliques.....	73
VIII.7.1 Ouvrages transversaux	73
VIII.7.2 Ouvrages longitudinaux.....	73
VIII.8. Conclusion.....	74
CHAPITRES IX : ETUDE GEOTECHNIQUE ET GEOLOGIQUE	70
IX.1. Introduction.....	70
IX.2. Étude Géologique	70
IX.2.1. Aspect tectonique de la zone d'étude	70
IX.2.2. Aperçu géologique local (tracé PK 410+500 – PK 427+239)	70
IX.2.3. Hydrogéologie le long du tracé.....	71
IX.3. Étude Géotechnique.....	72
IX.3.1. Contenu de la campagne d'investigation géotechnique	72
IX.3.1.1. Reconnaissance in situ.....	72
IX.3.1.2. Reconnaissance au laboratoire.....	72
IX.3.2. Synthèse des résultats géotechniques	74
IX.3.3. Interprétation des résultats.....	77
IX.4. Localisation des zones à risques	78
IX.4.1. Zones de faible portance QS0.....	78
IX.4.2. Zones inondables.....	79
IX.4.3. Agressivité chimique du sol	79
IX.4.4. Phénomène d'ensablement	79
IX.5. Gîtes d'emprunts et carrières	80
IX.6. Vérification de stabilité des talus.....	80
IX.6.1. Cas déblai	80
IX.6.2. Cas remblai.....	81

IX.7. Conclusion	81
CHAPITRE X : ASSISE FERROVIAIRE	83
X.1. Introduction	83
X.2. Différentes couches de l'assise ferroviaire	83
X.2.1. Le ballast.....	83
X.2.2. La sous-couche	84
X.2.3. La couche anti-contaminante	85
X.2.4. La plateforme et la couche de forme.....	85
X.3. Classification des sols de la plateforme – Section 04.....	85
X.4. Partie Supérieure de Terrassement (PST) et Arase de Terrassement (AR)	86
X.5. Classe de portance de la plateforme	86
X.5.1. Plateforme proposée pour la Section 04	87
X.5.2. Couche de forme	87
X.6. Calcul des épaisseurs minimales des couches d'assise	87
X.6.1. Formule de dimensionnement UIC 719R.....	87
X.6.2. Application à la Section 04.....	88
X.7. Structure de voie retenue – Application au projet	88
X.7.1. Épaisseur de la couche de ballast.....	88
X.7.2. Sous-couches retenues.....	88
X.7.3. Tableau récapitulatif de la structure de voie	89
X.8. Dispositions constructives pour les zones sensibles	90
X.8.1. Zones de faible portance – Traitement des QS0.....	90
X.8.2. Zones inondables – Protection des remblais	90
X.8.3. Zone d'ensablement éolien (PK 418+000 – PK 421+500)	90
X.9. Synthèse par zone géotechnique – Structure d'assise adoptée	91
X.10. Conclusion	91
CHAPITRE XI : PROFIL EN TRAVERS.....	93
XI.1. Introduction.....	93
XI.2. Définition et types de profils en travers	93
XI.2.1. Profil en travers type	93
XI.2.2. Profil en travers courant.....	94
XI.3. Éléments constitutifs du profil en travers.....	94
XI.3.1. La superstructure.....	94

XI.3.2. La couche de ballast	94
XI.3.3. Les couches de sous-ballast et de forme	95
XI.3.4. La plateforme	95
XI.3.5. Les talus.....	95
XI.3.6. L'assainissement transversal	96
XI.4. Profil en travers type retenu.....	96
XI.4.1. Caractéristiques géométriques générales	96
XI.4.2. Profil type en zone de remblai.....	97
XI.4.3. Profil type en zone de déblai	98
XI.4.4. Comparaison des profils type remblai et déblai	98
XI.5. Calcul des cubatures de terrassement.....	99
XI.6. Analyse du bilan Déblai / Remblai.....	100
XI.6.1. Synthèse des volumes	100
XI.6.2. Interprétation du bilan	100
XI.6.3. Besoins en matériaux d'apport.....	101
XI.6.4. Mouvement des terres – Zones caractéristiques.....	101
XI.7. Recommandations pour l'exécution des terrassements.....	102
XI.7.1. Compactage des remblais	102
XI.7.2. Sécurité des talus	102
XI.7.3. Protection contre l'ensablement	102
XI.8. Conclusion	103
CHAPITRE XII : CONCEPTION DE LA GARE de Molaye Lahcen.....	104
XII.1. Introduction.....	104
XII.2. Type de gare	104
XII.3. Le plan de masse de la gare.....	104
XII.3.1. Conditions de conception de la gare de croisement	104
XII.3.2. Disposition transversale – voies et quais.....	105
XII.3.3. Caractéristiques générales de la gare	106
XII.4. Caractéristiques de la gare de croisement.....	107
XII.4.1. Déclivité.....	107
XII.4.2. Appareils de voie (ADV).....	107
XII.4.3. Garage franc	108
XII.4.4. La longueur utile.....	108

XII.4.5. Les heurtoirs.....	109
XII.5. Les voies de la gare.....	109
XII.5.1. Voies principales (V1 et V2)	109
XII.5.2. Voies de service (V3 et V4)	109
XII.6. Les quais.....	110
XII.6.1. Généralités	110
XII.6.2. Caractéristiques des quais	110
XII.6.3. Équipements des quais.....	110
XII.7. Profil en travers type de la gare en déblai	111
XII.7.1. Contexte de la zone en déblai	111
XII.7.2. Description du profil en travers	111
XII.7.3. Structure de l'assise ferroviaire	112
XII.8. L'assainissement longitudinal de la gare	113
XII.9. Signalisation ferroviaire en gare	113
XII.9.1. Le rôle des installations de signalisation.....	113
XII.9.2. Les signaux ferroviaires en gare.....	114
XII.9.3. Principe de base du cantonnement	115
XII.9.4. Application sur notre projet – BAL + ERTMS Niveau 2.....	115
XII.10. Conclusion	116
CHAPITRE XIII : SIGNALISATION FERROVIAIRE	117
XIII.1. Introduction.....	117
XIII.2. Rôle des installations de signalisation	117
XIII.3. Les risques ferroviaires	117
XIII.4. Fonctions des signaux.....	118
XIII.5. Implantation longitudinale	118
XIII.6. Les signaux ferroviaires du projet.....	118
XIII.7. Principe de base du cantonnement.....	119
XIII.8. Les types de blocs.....	120
XIII.9. Le système de signalisation moderne ERTMS.....	120
XIII.10. Application sur notre projet	120
XIII.11. Conclusion	120
CHAPITRE XIV : ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT	122
XIV.1. Introduction.....	122

XIV.2. Cadre législatif et réglementaire	122
XIV.3. Description du site	123
XIV.4. Analyse de l'état initial de la zone du projet.....	123
XIV.4.1. Situation géographique et administrative	123
XIV.4.2. Ressources physiques, biologiques et humaines	124
XIV.5. Ensablement éolien — contrainte environnementale majeure.....	125
XIV.6. L'impact du projet	125
XIV.6.1. Les impacts positifs.....	125
XIV.6.2. Les impacts négatifs et les mesures d'atténuation	126
XIV.7. Influence de l'environnement sur la réalisation du projet.....	127
XIV.8. Conclusion	128
CHAPITRE XV : DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF.....	129
CONCLUSION GENERALE	133

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II -1 : Vitesses du vent et vitesses de déflation.....	9
Tableau II-1 : Résultats d'analyse granulométrique.....	10
Tableau III.1: Analyse comparative multicritère entre les modes de transport ferroviaire et routier en zones désertiques.....	14
Tableau IV -1 Fiche technique de notre tracé	16
Tableau IV -2: Altitudes min/max le long du tronçon — à extraire du profil en long.....	17
Tableau IV.3 : Synthèse des principaux paramètres climatiques de la région d'In Salah	17
Tableau IV.4: Principales caractéristiques géométriques et techniques de la voie ferrée du projet.....	19
Tableau IV.5 : Spécifications techniques et constituants de la superstructure de la voie ferrée	19
Tableau V.1 : Caractéristiques géométriques et mécaniques du profil de rail UIC 60 E1.....	21
Tableau V.2 : Paramètres et plages de température pour la pose du Rail Soudé en Long (RSL).....	22
Tableau V.3 : Caractéristiques techniques et paramètres de pose des traverses en béton monobloc	23
Tableau V.4 : Caractéristiques et spécifications techniques du système d'attaches élastiques du rail	24
Tableau V.5 : Spécifications et exigences techniques de la couche de ballast (Norme UIC 719R)	25
Tableau V.6 : Synthèse des spécifications retenues pour la superstructure du tronçon In Salah (PK 410+500 – PK 427+329).....	26
Tableau VI.1 : Paramètres fondamentaux et critères de conception géométrique du tracé en plan	28
Tableau VII.1 : Limites admissibles de la déclivité maximale en fonction de la longueur de la rampe.....	43
Tableau VII.2: Calcul des rayons minimaux admissibles en profil en long pour le raccordement vertical	44
Tableau VII.3 : Calcul des longueurs minimales des déclivités et des raccordements verticaux	44
Tableau VII.4 : Tableau récapitulatif des paramètres de conception géométrique en profil en long	44
Tableau VII.5 : Synthèse des contraintes spécifiques rencontrées le long du tracé et mesures d'adaptation adoptées.....	55
Tableau VIII.1 – Précipitations maximales journalières	58
Tableau VIII.2 – Caractéristiques morphologiques des bassins versants (extrait représentatif).....	60
Tableau VIII.3 – Coefficients de ruissellement selon la méthode de Kenessey.....	65
Tableau VIII.4 – Débits de crue Q100 et ouvrages retenus (bassins versants représentatifs).....	66
Tableau VIII.5 – Vérification hydraulique des buses	69
Tableau VIII.6 – Vérification hydraulique des dalots.....	71
Tableau VIII.7 – Dimensionnement du fossé trapézoïdal retenu	73
Tableau IX.1 – Lithologie de la zone d'étude	73
Tableau IX.2 – Synthèse des résultats géotechniques sur les sondages carottés	74

Tableau IX.4 – Analyse chimique des échantillons prélevés	77
Tableau IX.5 – Sections de faible portance QS0 et solutions préconisées	78
Tableau IX.6 – Gîtes d'emprunts et carrières proposés	80
Tableau IX.7 – Résultats de calcul de stabilité du talus en déblai (pente 2H/1V)	81
Tableau IX.8 – Résultats de calcul de stabilité du talus en remblai (pente 3H/2V)	81
Tableau X.1 – Classe de portance de la plateforme (Normes UIC 719R)	86
Tableau X.2 – Paramètres de dimensionnement de la couche d'assise (UIC 719R)	88
Tableau X.3 – Structure de voie retenue pour la Section 04 (PK 410+500 – PK 427+329)	89
Tableau X.4 – Synthèse de la structure d'assise par zone PK	91
Tableau XI.1 – Caractéristiques du profil en travers type – Pleine voie	96
Tableau XI.2 – Comparaison des caractéristiques des profils type remblai et déblai	98
Tableau XI.3 – Récapitulatif des volumes de matériaux de l'assise ferroviaire (COVADIS)	99
Tableau XI.4 – Bilan général Déblai/Remblai de la Section 04	100
Tableau XII.1 : Caractéristiques dimensionnelles et fonctionnelles de la disposition transversale des voies et quais en gare	105
Tableau XII.2 – Caractéristiques générales de la Gare Molaye Lahcen	106
Tableau XII.3 – Appareils de voie utilisés dans la gare Molaye Lhecen	107
Tableau XII.4 – Longueurs caractéristiques de la Gare Molaye Lahcen	109
Tableau XII.5 – Caractéristiques des quais Q1 et Q2	110
Tableau XII.6 – Description transversale du profil en travers de la gare	111
Tableau XII.7 – Structure de l'assise ferroviaire en gare	112
Tableau XII.8 – Signaux ferroviaires implantés en gare Molaye Lahcen	114
Tableau XIII.1 : Matrice d'identification des risques ferroviaires, leurs causes et leurs conséquences potentielles	117
Tableau XIII.2 : Synthèse de la signalisation ferroviaire retenue et signification des principaux feux du projet	118
Tableau XIV.1 : Synthèse du cadre législatif et réglementaire applicable en matière de protection de l'environnement en Algérie	122
Tableau XIV.2 : Synthèse de la situation géographique et administrative de la zone du projet	123
Tableau XIV.3 : Synthèse des caractéristiques des ressources physiques et biologiques de la zone d'étude	124
Tableau XIV.4 : Impacts positifs du projet	125
Tableau XIV.5 : Impacts négatifs et mesures d'atténuation	126
Tableau XV-1 devis quantitatif estimatif	129

LISTE DES FIGURES

Figure I -1 : Gare Sntf D'agha Alger	3
Figure I-2:Repartition Du Trafic Du Transport Ferroviaire.....	7
Figure II -1 : Schéma d'implantation des palissades anti-sable.....	11
Figure III -1 : Carte du réseau ferroviaire algérien avec pénétrantes Sud.....	14
Figure IV -1 : Situation géographique du tronçon — carte de localisation	16
Figure IV -2 : Tracé général du projet sur image satellite	18
Figure V-1 Profil rail du type UIC60 E1.....	22
Figure V-2 Les traverses utilisées dans le projet.	23
Figure V-3 les types des attaches.....	24
Figure V-4 les composantes d'attache type Vossloh	25
Figure VI-1 Eléments géométriques du tracé en plan.....	27
Figure VI-2 Définition du Dévers.....	28
Figure VI-3 Schéma de raccordement de devers.....	29
Figure VII-1 Eléments géométriques du profil en long	42
Figure VIII-1 délimitation des bassins versants.....	59
Figure XII-1 garage franc.....	108

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Au cours de la dernière décennie, le secteur ferroviaire en Algérie a fait l'objet d'un programme ambitieux de modernisation et de développement, visant à renforcer la performance globale du système de transport national. Cette stratégie s'inscrit dans une logique d'aménagement du territoire et de soutien à la croissance économique, à travers l'amélioration de la mobilité des personnes et des marchandises.

Les investissements engagés ont permis la réhabilitation des infrastructures existantes, caractérisées par leur vétusté, ainsi que la réalisation de nouvelles lignes ferroviaires répondant aux normes techniques actuelles. Ces actions incluent notamment le doublement des voies, l'électrification de certains axes stratégiques, ainsi que la mise en place de systèmes modernes de signalisation, de télécommunication et de gestion du trafic ferroviaire.

Dans ce cadre, le développement du réseau ferroviaire vise à optimiser les performances d'exploitation en termes de capacité, de sécurité et de réduction des temps de parcours. Il contribue également au désenclavement des régions isolées et à leur intégration dans le réseau national, renforçant ainsi la cohésion territoriale.

Le présent Projet de Fin d'Études s'inscrit dans cette dynamique et porte sur l'étude en Avant-Projet Détaillé (APD) d'un tronçon ferroviaire situé dans la région d'Aïn Salah, s'étendant du PK 410+500 au PK 427+329, incluant l'implantation d'une gare ferroviaire au PK 418+237, dénommée « Moulay Lahcen ». Cette étude a pour objectif de définir les caractéristiques géométriques et techniques du tracé, d'évaluer les contraintes du terrain, et de proposer des solutions optimales conformes aux exigences de sécurité, de fiabilité et de durabilité des infrastructures ferroviaires.

CHAPITRE I :
GENERALITE SUR LES VOIES
FERREE

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES VOIES FERREE

I-1- Définition

Le chemin de fer est un système de transport collectif guidé de personnes et de marchandises. Il constitue une alternative à la voiture, aux camions et à la congestion des portes de nos grandes agglomérations. Il permet des déplacements efficaces et reste en pratique le mode de transport terrestre dominant dans plusieurs pays. Le chemin de fer est un transport qui a influencé l'urbanisme car c'est un facteur essentiel de l'aménagement du territoire puisque c'est grâce à lui qu'on a pu transporter facilement les marchandises sur des grandes distances, et qu'ont été rendues possibles les grandes concentrations de population dans les villes industrielles avec le développement du tramway et du métro. Ses aptitudes à des transports de masse tant marchandises que voyageurs et l'encombrement moindre des zones urbaines qu'il occasionne en font un moyen de choix pour satisfaire le prodigieux développement des transports de voyageurs de banlieue, des transports inter urbains de voyageur et du transport des marchandises

I-2- Description des éléments constitutifs de la voie ferrée

Le matériel roulant circule communément en convois, appelés trains ou rames. Les convois sont composés de wagons ou de voitures tracés par des locomotives. Il peut également s'agir de rames autotractées c'est-à-dire incluant leur propre système de traction. La voie est constituée par un assemblage d'éléments qui transmettent à la plateforme la charge des roues. La voie classique comporte des rails maintenus par des traverses reposant sur une épaisseur variable de ballaste en principe isolée de la plateforme par une sous couche. Les rails sont solidaires aux traverses par un système d'attaches.

I-3- Caractéristiques fondamentales du chemin de fer

Le chemin de fer a ses qualités propres qui le distinguent des autres modes de transport par :

- Le contact métal sur métal limite à une faible valeur la résistance au roulement ce qui permet aussi la remorque des charges élevées avec une puissance et un personnel de bord souvent réduit à un homme. En contrepartie, ce contact métal sur métal augmente les distances de freinage.
- le chemin de fer est un transport guidé qui n'offre aux véhicules qu'un seul degré de liberté en avant ou en arrière. Les changements de voie ne peuvent se faire qu'aux aiguillages, le dépassement est impossible. Ceci constitue une sécurité vis-à-vis de l'accident.
- La circulation des wagons ne se fait pas isolément comme sur la route mais en convoi.
- Le débit d'une voie ferrée est supérieur à celui d'une autoroute à 4 voies.
- Le coût moyen du kilomètre d'une voie ferrée à deux voies est moins cher que celui d'une autoroute à deux fois deux voies dans la même condition il présente un faible degré de pollution.
- A égalité de kilomètre transportés, le chemin de fer consomme deux à trois fois moins de carburant à la tonne transportée qu'un camion lourd

I-4- Historique du chemin de fer dans le monde

Le chemin de fer est né sur le carreau des mines pour transporter le charbon, depuis les puits d'extraction jusqu'à la voie d'eau, qu'elle soit fluviale ou maritime. Dès le XVII^e siècle, les

mineurs utilisèrent en effet des barres de guidage en bois pour faire glisser les chariots, avant d'adopter par la suite des rails métalliques. La traction était généralement assurée par les chevaux, jusqu'à l'apparition de la première locomotive à vapeur, mise au point par l'ingénieur anglais Richard Trevithick en 1803, et testé avec succès dans le sud du pays de Galles. Cette découverte marqua le début de l'ère des chemins de fer.

La première voie ferrée au monde fut construite en 1825 en Angleterre, entre Stockton et Darlington, près de Newcastle (Yorkshire). Cette ligne transportait exclusivement du charbon, tout comme celles qui furent construites à la même époque en Ecosse, Ainsi que dans le Lancashire. C'est dans cette dernière région que fut implantée la première véritable ligne de chemin de fer, entre Liverpool et Manchester (51 Km). Mise en service en 1803, cette ligne aurait non seulement le transport du charbon, mais celui des voyageurs

A partir de 1840, le chemin de fer connut un développement remarquable les pays qui disposaient de charbon, ou qui pouvaient facilement en importer, comme l'Europe et les Etats Unis. Bénéficiant de la révolution industrielle, les grands réseaux ferrés furent construits entre 1830 et 1890. En 1875, un demi-siècle après la naissance des premières voies ferrées, en comptait 129 000 Km de lignes au Etats-Unis et 123 000 Km en Europe occidentale. Quelques années plus tard en dénombrait 363 000 Km de voies ferrées dans le monde, dont 172 000 Km en Europe et 165 000 aux Etats-Unis. En 1950, ces dernières étaient desservies par 350 000 Km de lignes ferroviaires sur un total de 1,3 millions de Km.

Si les chemins de fer se sont implantés sur les cinq continents, leur répartition apparaît très inégale. De nombreux Etats, comme la plupart des pays africains, ne disposent que d'un petit nombre de voies ferrées, construite à l'époque coloniale, Comme le cas de L'Algérie dont les premières voies ferrées ont été établis pendant cette époque aux environs de 1863 et elles étaient toutes en écartement étroit (1055 mm).

I-5- Histoire du chemin de fer en Algérie

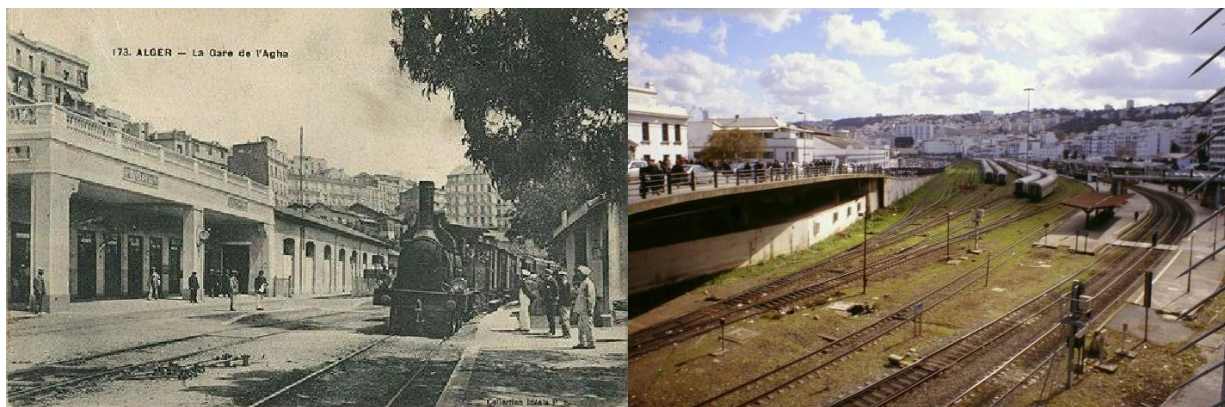


Figure I -1 : Gare Sntf D'agha Alger

La réalisation du réseau de chemin de fer algérien s'est faite par étapes successives. Durant la période coloniale, trois programmes ont été initiés par l'administration :

I-5-1- Le programme de 1857

Un décret daté du 8 avril 1857 autorisa la construction de 1357 km de lignes.

Le 12 décembre 1859 l'armée d'occupation ouvre le chantier de ligne Alger– Blida. Une entreprise de statut privé, appelée « compagnie des chemins de fer algérien » est créée et celle-ci prend le relais de l'armée à partir du 11 juillet 1860 pour achever la ligne. Cette compagnie obtient en même temps une concession pour la réalisation des lignes Oran– Sétif et Constantine– Skikda, mais elle rencontre des problèmes de financement et seule la ligne Alger– Blida a pu être réalisée et ouverte au service voyageur le 8 septembre 1862. Au cours de la période 1857–1878 les lignes ou tronçons de lignes suivantes, totalisant une longueur de 1365 km, ont été réalisés :

- Annaba–AinMokra
- Annaba–Bouche gulf– Guelma
- Khroub–Oued Zeneti
- Constantine– skikda
- Constantine– Sétif
- Alger–Thénia
- Alger–Oran
- Arzew–Mohamedia
- Mohamedia–Mecheria
- Ouedtlat– Sidi Bel Abbès

I-5-2- Le programme de 1879

Au cours de la période 1879– 1906 les lignes suivantes, totalisant une longueur de 2035 km, ont été réalisées ou entrainées :

- Soukahras– tebessa-le kouif et embranchement vers la frontière tunisienne.
- Ain-mokra-ramdane djamel
- Ouledrahmoune–khenchela
- Elguerrah–biskra
- Sétif–thénia avec embranchement vers tizi-ouzou, bejaia et sour elghozlane
- Blida–berrouaghia
- Mostaganem– relizane–tiaret
- Oran–arzew
- Senia–temouchent
- Sidi bel abbès– telemcen– frontier
- Tabia–crampel

- Mecheria– bechare Tizi- mascara

I-5-3- Le programme de 1907 :

En 1907, un troisième programme de nouvelles lignes portant sur 1256 km de lignes est établi et vient s'ajouter au réseau existant de 3400 km de lignes ouvertes ou en cours de réalisation. Au cours de la période 1907-1946 les lignes ou tronçon de lignes suivant une longueur de 1614 km, ont été réalisés:

- Ainbeida–tebessa
- Elmilia– jijel
- Biskra– touggourt avec embranchement vers tolga et el oued
- Constantine– oued athemania
- Berrouaghia–djelfa
- tiaret- mahdia–cl bouguerra
- mascara– mecheria avec embranchement vers relizane
- sidi bel abbes–tizi
- telimcen– beni saf
- mostaganem– la macta.

En 1946, le réseau algérien comprenait 5014 km de lignes en exploitation sans compter l'embranchement minier.

Le 27 septembre 1912 est créée la compagnie des chemins de fer algériens (office CFAE).le premier janvier 1939 est institué un office des chemins de fer algériens (office CFA).le premier janvier 1960 est créée une société des chemins de fer français en Algérie jusqu'au 16 juin 1963, date à laquelle sera créée la société nationale des chemins de fer algérien (SNCFA).

I-6- Situation du réseau actuel :

I-6-1- Constitution du réseau

En 2026, le réseau ferroviaire algérien est de 5 738 km ^[OBJ], faisant de l'Algérie le 2ème réseau ferroviaire d'Afrique après l'Afrique du Sud, géré par la SNTF (Société Nationale des Transports Ferroviaires), avec ANESRIF comme agence de réalisation des investissements.

- Répartition géographique du réseau

Le réseau se compose de plusieurs axes :

Axe Nord : 1 822 km reliant l'Est et l'Ouest du pays — modernisation et doublement de voies en cours

Axe Hauts Plateaux : 1 046 km (rocade Tébessa → Sidi Bel Abbés), avec 73 km de travaux restants dont l'achèvement est prévu en 2026

Ligne Minière Est : 422 km dédiée au transport du phosphate

➤ Projets inaugurés récemment (2024–2025)

Le 24 avril 2025, le Président de la République a mis en service le premier tronçon de 100 km de la ligne stratégique Béchar–Tindouf–Gara Djebilet (Béchar–Abadla).

En 2025, la SNTF a lancé de nouvelles lignes couvrant 814 km, dont : Alger–Tlemcen, Tlemcen–Alger, Sidi Bel Abbès–Oran et Constantine–Biskra via Batna.

➤ Les 5 grands projets de 2026

L’Algérie s’apprête à livrer 5 grands projets ferroviaires en 2026, représentant 2 340 milliards DA d’investissement. La ligne minière Sud-Ouest est prête pour l’exploitation commerciale avec une capacité de 50 millions de tonnes de minerai de fer par an, et la ligne minière Est (420 km) est dédiée au transport de 10 millions de tonnes de phosphate.

➤ Projet phare : Alger – Tamanrasset

La ligne Alger–Tamanrasset est désormais lancée. Le réseau passera à 6 820 km avec les nouvelles lignes de l’Est en 2027, puis à 9 896 km après la mise en service complète Alger–Tamanrasset. Actuellement, 250 km sont déjà exploités (Boughezoul–Laghouat), 639 km sont finalisés au niveau des études, et les études pour 1 050 km supplémentaires sont en cours. Il reste 1 689 km à construire.

Les travaux sur d’autres tronçons de la ligne Alger–Tamanrasset seront lancés en 2026.

➤ Modernisation et investissement

Avec 50 % des infrastructures datant de plus de 30 ans, la SNTF a investi 300 millions USD entre 2023 et 2024 pour la maintenance. Pour 2025, une allocation de 125 millions USD supplémentaires est accordée par l’État. La SNTF prévoit également l’introduction de trains modernes avec couchettes pour les longues distances. [06]

L’objectif gouvernemental est de porter le réseau total à 12 500 km à l’horizon 2030.

I-6-2- Parc du matériel roulant

Le matériel roulant (locomotives, wagons, voitures à voyageurs) a connu dernièrement un effort d’investissement pour rajeunir le parc et d’adapter aux différentes missions du chemin de fer (transport collectif sur de longues distances et transport spécialisé). Le parc du matériel roulant est constitué de :

1. 145 locomotives diesel pour voie normale (V.N)
2. 27 locomotives diesel pour voie étroite (V.E)
3. 27 locomotives tractrices pour (V.N)
4. 600 voitures de voyageurs
5. 371 voitures pour les grandes lignes dont 330 pour les (V.N). En outre, le parc comprend des véhicules d’entretien de travaux de la pose et de renouvellement et c.

I-6-3- Le trafic ferroviaire

Le chemin de fer qui assurait en 1970 près de 30% du trafic national de voyageurs et de marchandises a vu sa part relative du marché, réduite actuellement à seulement 12.3 % du trafic marchandises et 16.2% du trafic voyageurs. Le schéma du secteur suivant indique la répartition du trafic et son pourcentage pour chaque type de transport ferroviaire :

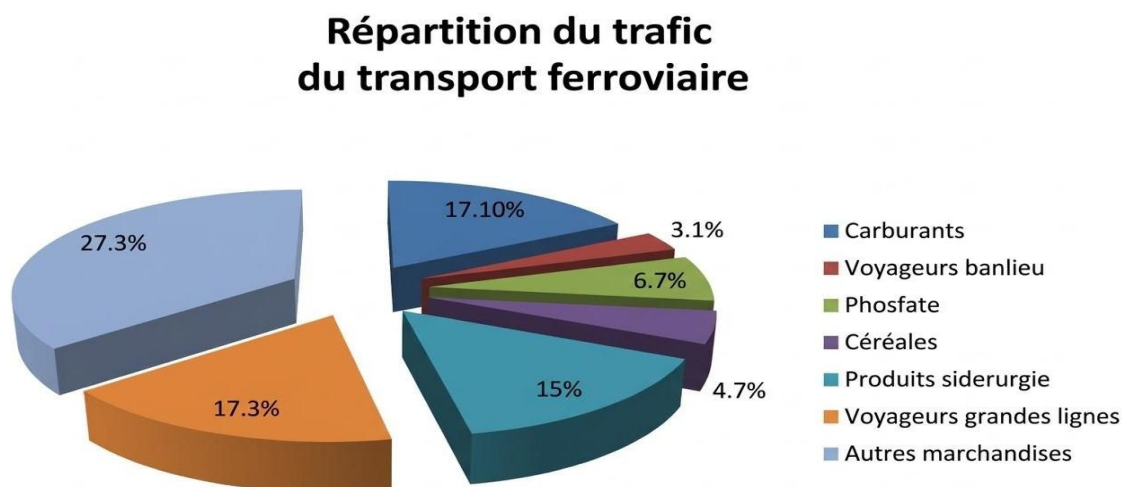


Figure I-2: Répartition Du Trafic Du Transport Ferroviaire

I-6-4- Le transport commercial

Le transport commercial ferroviaire en Algérie concerne surtout les carburants liquides, les produits sidérurgiques et une partie du phosphate.

En 1995 le volume de marchandises transportées a atteint 5.243.645 tonnes avec un parcours moyen de la tonne de 245 km.

Malgré la recette de transport augmentée de 8.845% (entre 1994 et 1995) le tonnage des wagons complets est en baisse de 15.85%

I-6-5- Le transport de voyageurs

Le trafic des voyageurs se voit dans les grandes lignes par un pourcentage de 17.3% du trafic ferroviaire total et celui des banlieues est de 3.1%

En 1995 le nombre de voyageurs transportés a atteint 40.467.780 avec un parcours moyen de 39 km et une recette de 737.180.529 DA. La baisse marquée pour le transport ferroviaire est dû aux :

1. Incidents d'exploitation
2. Actes de sabotage

3. Passivité commerciale

D' où un recours aux autres modes de transport parmi lesquels, la route qui assure l'essentiel des transports.

I-7- Classement des lignes de chemin de fer

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

Les voies principales affectées à la circulation des trains.

Les voies de circulation affectées à desserts interne des grands complexes ferroviaire.

Les voies de service affectées au manœuvre, qui peuvent être d'anciennes voies principales.

Les voies de gares sont des voies de service affectées au stationnement du matériel roulant .

Les lignes sont généralement classes en groupes ou en catégories suivant la valeur de leur trafic.

Groupe 1 : $T_f > 120.000$ tonnes

Groupe 2 : $120000 \geq T_f > 85000$ tonnes

Groupe 3 : $85000 \geq T_f > 50000$ tonnes

Groupe 4 : $50000 \geq T_f > 28000$ tonnes

Groupe 5 : $28000 \geq T_f > 14000$ tonnes

Groupe 6 : $14000 \geq T_f > 7000$ tonnes

Groupe 7 : $7000 \geq T_f > 3500$ tonnes

Groupe 8 : $3500 \geq T_f > 1500$ tonnes

Groupe 9 : $1500 \geq T_f$

CHAPITRE II : L'ENSABLEMENT

CHAPITRE II : L'ENSABLEMENT

II.1 Introduction

La région d'Aïn Salah est caractérisée par un environnement désertique soumis à de fréquentes tempêtes de sable. L'ensablement constitue l'une des contraintes majeures pour toute infrastructure linéaire, notamment les voies ferrées. Ce chapitre présente les mécanismes de ce phénomène ainsi que les techniques de protection appliquées dans le cadre du présent projet.

II.2 Définition et conséquences de l'ensablement

L'ensablement est le phénomène par lequel des particules de sable, transportées par le vent, s'accumulent sur ou autour des infrastructures. Ses principales conséquences sur les voies ferrées sont :

- Recouvrement de la plateforme et des rails, rendant la circulation impossible
- Détérioration du ballast par intrusion de fines particules sableuses
- Réduction de la visibilité pour les conducteurs de trains
- Dégradation accélérée des équipements mécaniques et électroniques
- Augmentation des coûts de maintenance et d'exploitation

II.3 Mécanismes de l'ensablement

II.3.1 Le vent :

Le vent est le vecteur principal du transport éolien. Dans la région d'Aïn Salah, les vents dominants soufflent principalement du nord-est (Sirocco) et du nord-ouest. La vitesse de déflation, c'est-à-dire la vitesse minimale pour mettre en mouvement les particules, est estimée à :

Tableau II -1 : Vitesses du vent et vitesses de déflation

Mois	Vitesse du vent (km/h)	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de déflation
Janvier	17.4	4.83	faible
Février	17.5	4.86	Faible
Mars	18.3	5.08	début déflation
Avril	18.0	5.00	modérée
Mai	18.6	5.16	modérée
Juin	18.4	5.11	modérée
Juillet	20.8	5.77	forte
Août	20.3	5.63	forte
Septembre	18.1	5.02	modérée
Octobre	17.2	4.77	faible
Novembre	16.8	4.66	Faible
Décembre	17.1	4.75	faible

II.3.2 Nature et granulométrie du sol

La nature du sol conditionne la mobilité des particules. Les sables fins (diamètre 0,1 à 0,5 mm) sont les plus susceptibles d'être emportés par le vent. Les analyses granulométriques réalisées dans la zone du projet montrent :

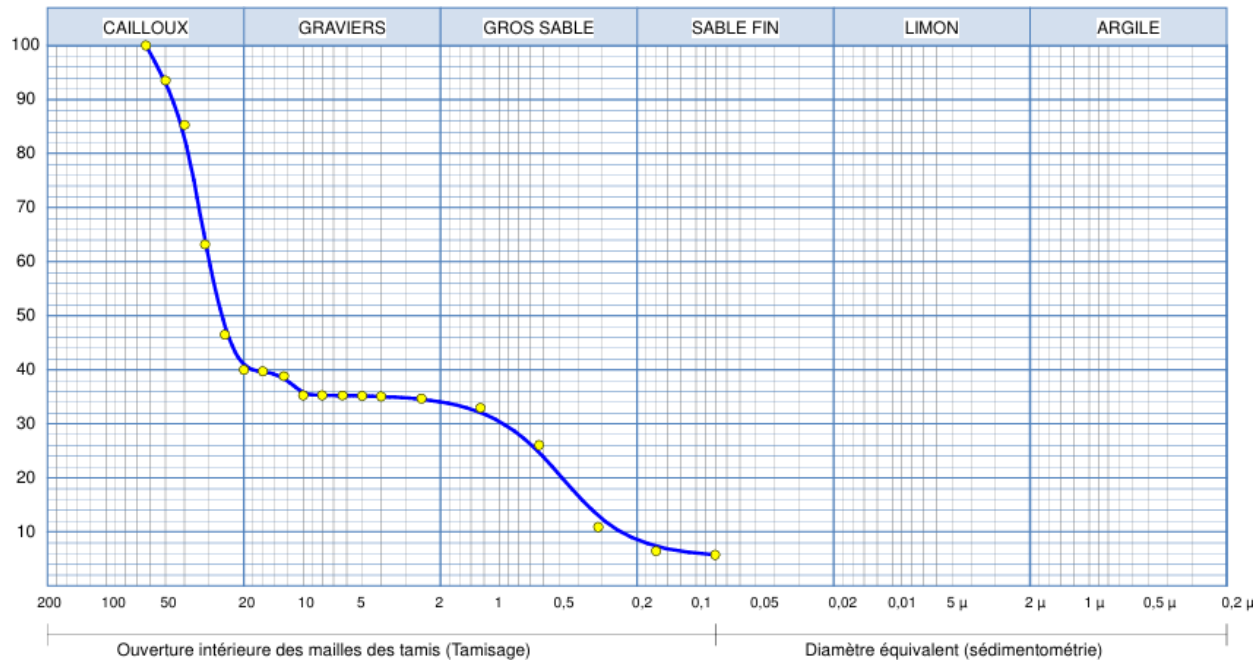


Tableau II-1 : Résultats d'analyse granulométrique

sondage	Profondeur m	Granulométrie		
		Dmax %	2mm%	80 µm %
SC30	04.00-05.00	50	34.00	05.74

II.3.3 État de la végétation

L'absence de végétation dans les zones désertiques prive le sol de toute protection naturelle contre l'érosion éolienne. La zone traversée par le projet est quasi dépourvue de couverture végétale significative.

II.4 Modes de transport des particules

Le transport éolien des particules sableuses s'effectue selon trois modes distincts :

1. La saltation : mode dominant, représentant 70 à 80 % du transport total. Les grains rebondissent sur la surface selon des trajectoires paraboliques.
2. La reptation (ou charriage) : déplacement de grains à la surface du sol sous l'effet des impacts des grains en saltation (20 à 25 %).
3. La suspension : transport de fines particules maintenues en suspension dans l'air (< 5 %).

II.5 Procédés de lutte contre l'ensablement

II.5.1 Lutte mécanique

La lutte mécanique consiste à ériger des obstacles physiques pour capter, dévier ou freiner le transport éolien :

- Palissades en bois ou en toile (claires) : installées perpendiculairement aux vents dominants

- Murs anti-sable (Drâas) : constructions en pierre ou en béton formant des barrières
- Géotextiles et nappes de protection de la plateforme
- Désensablement périodique par engins mécaniques

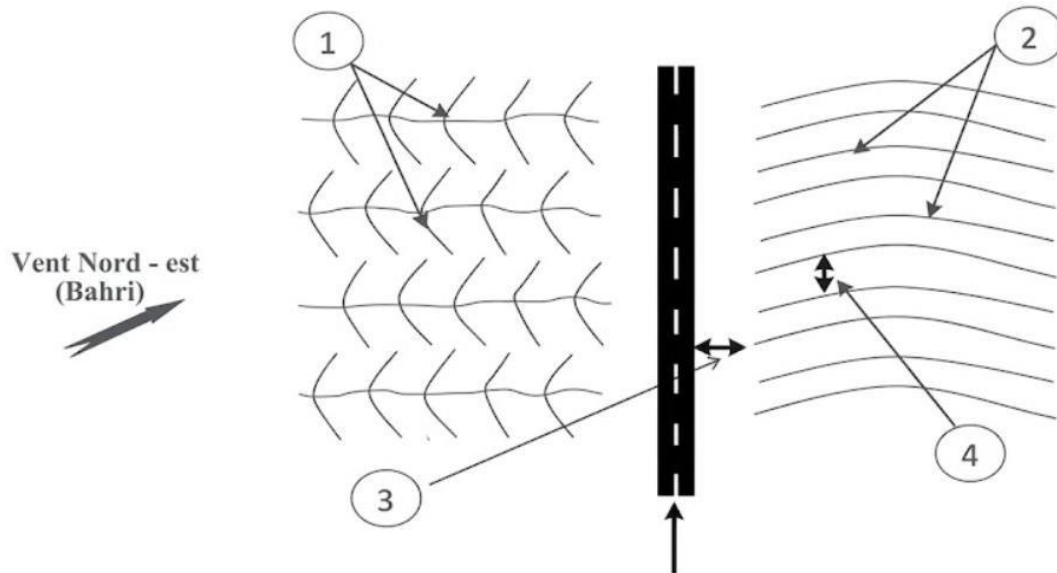


Figure II -1 : Schéma d'implantation des palissades anti-sable

II.5.2 Fixation chimique (Technique du Mulch)

Cette technique consiste à répandre sur la surface sableuse un liant (bitume, résine, émulsion) qui, en pénétrant dans les premiers centimètres, crée une croûte rigide empêchant le déplacement des grains. Le dosage habituel est de 2 à 4 litres par m².

II.5.3 Fixation biologique

La végétalisation avec des espèces adaptées au milieu aride (Atriplex, Haloxylon, Tamarix) constitue la méthode la plus durable sur le long terme. Elle nécessite cependant un système d'arrosage et un suivi régulier.

II.6 Conclusion

L'ensablement représente un défi technique et opérationnel majeur pour ce projet, menaçant directement la régularité du trafic et l'intégrité des infrastructures. Pour y faire face, une stratégie intégrée combinant plusieurs niveaux de protection sera déployée :

- **Protections mécaniques de premier front :** L'installation de palissades brise-vent permettra de dévier les flux éoliens, tandis que la création de *drâas* (cordons dunaires artificiels orientés) stabilisera les mouvements de sable en amont de la voie.
- **Fixation chimique ciblée :** Sur les zones de sifflement et les versants les plus exposés, l'application de liants chimiques environnementaux (de type émulsion de bitume ou polymères stabilisants) permettra d'agglomérer le sable superficiel et de stopper net l'érosion éolienne.

Cette approche hybride et proactive permettra non seulement d'assurer la pérennité de la ligne ferroviaire face au risque d'ensablement, mais aussi de minimiser drastiquement les coûts d'entretien futurs en réduisant la fréquence des opérations de désensablement mécanique.

CHAPITRE III : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE III : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

III.1 Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique portant sur l'histoire du chemin de fer en Algérie, l'état actuel du réseau ferroviaire national et les enjeux du développement des lignes à grande vitesse dans les régions sahariennes.

III.2 Histoire du chemin de fer en Algérie

Le réseau ferroviaire algérien a été inauguré en 1862 avec la première ligne reliant Alger à Blida. Depuis l'indépendance, la Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF) assure la gestion et l'exploitation du réseau. Les grandes étapes du développement ferroviaire en Algérie sont :

4. 1862 : Inauguration de la première voie ferrée Alger – Blida
5. 1870–1900 : Extension du réseau vers l'Est (Constantine) et l'Ouest (Oran)
6. 1938 : Création du réseau des hauts plateaux
7. 1962 : Nationalisation et création de la SNTF
8. 2005 : Lancement du programme de modernisation et d'extension vers le Sud
9. 2013 : Lancement du projet de la ligne Touggourt – Hassi-Messaoud

III.3 Réseau ferroviaire algérien actuel

Le réseau ferroviaire algérien s'étend sur environ **5 738 km** de voies exploitées. Il comprend plusieurs axes stratégiques :

III.3.1 Rocade ferroviaire Nord

Longeant le littoral méditerranéen, cette rocade relie les principales agglomérations côtières d'Annaba à Tlemcen en passant par Alger et Oran.

III.3.2 Rocade des Hauts Plateaux

Axe traversant le Tell intérieur, reliant Souk Ahras à Tlemcen via Sétif, M'Sila et Tiaret.

III.3.3 Pénétrantes Sud

Plusieurs pénétrantes sont prévues ou en cours de réalisation pour désenclaver le Grand Sud algérien :

- Pénétrante Est : Touggourt – Hassi-Messaoud – In Amenas
- Pénétrante Centre : Laghouat – Ghardaïa – Ouargla – Aïn Salah – Tamanrasset (projet en cours)
- Pénétrante Ouest : Béchar – Tindouf

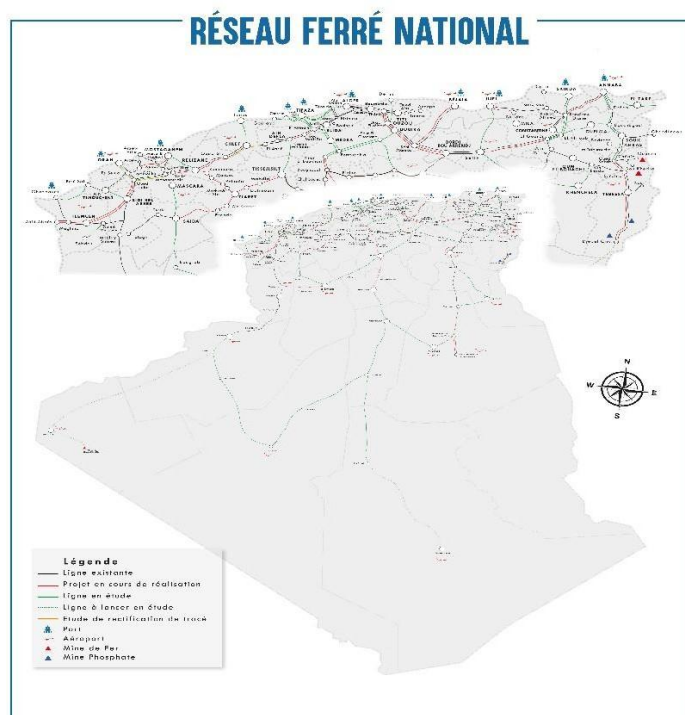


Figure III - 1 : Carte du réseau ferroviaire algérien avec pénétrantes Sud

III.4 La ligne Aïn Salah – Tamanrasset dans le contexte national

La ligne ferroviaire dont fait partie le tronçon étudié s'inscrit dans le grand projet de la pénétrante Centre reliant le Nord du pays au Grand Sud. Ce projet stratégique vise à :

- Désenclaver les wilayas du Grand Sud (Tamanrasset, In Salah)
- Faciliter le transport des hydrocarbures et des minerais
- Développer le tourisme saharien
- Réduire le trafic routier sur la RN1 et améliorer la sécurité

III.5 Avantages du transport ferroviaire

Par rapport aux autres modes de transport, le chemin de fer présente des avantages reconnus dans les zones désertiques :

Tableau III.1: Analyse comparative multicritère entre les modes de transport ferroviaire et routier en zones désertiques

Critère	Transport Ferroviaire	Transport Routier
Capacité de charge	Élevée (> 1 000 t/train)	Limitée (30–40 t/camion)
Consommation énergétique	Faible (3–5 L/100 t.km)	Élevée (15–25 L/100 t.km)
Sécurité	Très élevée	Risques accidentels élevés

Critère	Transport Ferroviaire	Transport Routier
Impact environnemental	Faible (émissions réduites)	Important
Coût d'exploitation	Faible sur longue distance	Élevé
Résistance au sable	Nécessite protection spécifique	Voie praticable sous réserve

III.6 Normes et références techniques utilisées

Les études du présent projet se basent sur les normes et références suivantes :

- Normes UIC (Union Internationale des Chemins de Fer) : UIC 406, UIC 703, UIC 719R, UIC 741
- Normes SNTF (Société Nationale des Transports Ferroviaires)
- AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association)
- EN 13481 – Exigences de performance pour les systèmes de fixation
- SNCF – Guide technique pour les lignes à grande vitesse

III.7 Conclusion

Cette recherche bibliographique a permis de situer le projet dans son contexte historique et national, et d'identifier les normes de référence applicables. Le tronçon Aïn Salah PK 410+500 – PK 427+329 s'inscrit dans une vision stratégique de développement du réseau ferroviaire algérien vers le Grand Sud.

CHAPITRE IV : PRESENTATION DE PROJET

CHAPITRE IV : PRESENTATION DE PROJET

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente le cadre géographique, climatique et technique du projet. Il définit les caractéristiques générales du tronçon étudié, les contraintes du site et les objectifs de l'étude en Avant-Projet Détaillé (APD).

IV.2 Présentation du site

IV.2.1 Situation géographique

Le tronçon étudié est situé dans la wilaya de Tamanrasset, dans le Grand Sud algérien, à proximité de la commune d'Aïn Salah. Il s'étend du PK 410+500 au PK 427+329, soit une longueur totale de 16 800 m (16,8 km).

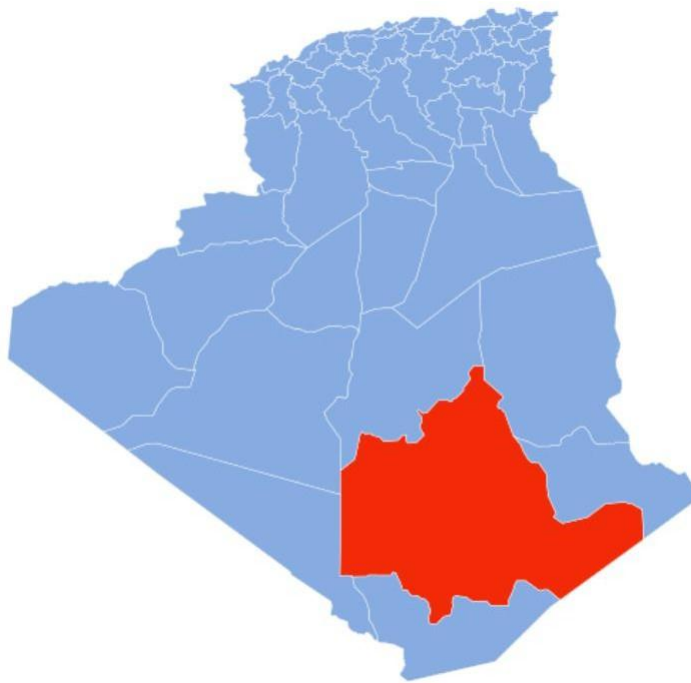


Figure IV -1 : Situation géographique du tronçon — carte de localisation

Tableau IV -1 Fiche technique de notre tracé

Paramètre	Valeur
Wilaya	Tamanrasset
Commune	Aïn Salah
PK début	410+500

Paramètre	Valeur
PK fin	427+329
Longueur du tronçon	16 800 m (16,8 km)
Gare incluse	Gare de Moulay Lahcen

IV22 Topographie et relief

La zone du projet est caractérisée par un relief globalement plat à légèrement ondulé, typique des regs sahariens. Les altitudes oscillent entre:

Tableau IV -2: Altitudes min/max le long du tronçon — à extraire du profil en long

Cot max	Cot min
916.826 m	876.900 m
PK 418+305	PK 411+515

IV23 Géologie

La région est composée essentiellement de formations quaternaires (alluvions, regs) reposant sur des formations crétacées et dévoniennes. Le sol de fondation est généralement constitué de sables et de graviers avec présence de croûtes calcaires.

IV24 Climat

La région d'Aïn Salah est l'une des plus chaudes du monde avec un climat hyperaride. Les données climatiques principales sont:

Tableau IV.3 : Synthèse des principaux paramètres climatiques de la région d'In Salah

Paramètre climatique	Valeur
Température maximale absolue	[45 °C]
Température minimale absolue	[6 °C]
Température moyenne annuelle	[25°C a 27°C]
Pluviométrie moyenne annuelle	[inférieure à 50 mm/an]
Vitesse maximale du vent	[4,9 m/s]

Paramètre climatique	Valeur
Humidité relative moyenne	[23 % à 27 %]

IV25 Sismicité

Selon le Règlement Parasismique Algérien (RPA 2024), la wilaya de Tamanrasset est classée en zone de sismicité faible (Zone 0). (sismicité négligeable).

IV3 Présentation du projet

Le projet s'inscrit dans le cadre du développement de la pénétrante ferroviaire centre, reliant la région nord du pays à Tamanrasset. Le tronçon PK 410+500 – PK 427+329 comprend une ligne à voie unique électrifiée conçue pour une vitesse de 220 km/h, avec la réalisation de la gare de Moulay Lahcen.



Figure IV -2 : Tracé général du projet sur image satellite

IV4 Caractéristiques du projet**IV41 Caractéristiques de base****Tableau IV.4: Principales caractéristiques géométriques et techniques de la voie ferrée du projet**

Paramètre	Valeur
Type de voie	Voie unique
Vitesse de projet (Vp)	220 km/h
Vitesse de circulation des trains	220 km/h
Écartement de la voie	1 435 mm (voie normale UIC)
Longueur du tronçon	16 800 m
Nombre de gares	1 (Gare de Moulay Lahcen)
Type de traction	Électrique (à préciser)
Charge à l'essieu	22,5 t (ligne voyageurs)

IV42 Caractéristiques de la voie**Tableau IV.5 : Spécifications techniques et constituants de la superstructure de la voie ferrée**

Paramètre	Spécification
Type de rail	Rail UIC 60 E1 (60 kg/m)
Type de traverse	Traverse en béton monobloc
Espacement des traverses	600 mm en pleine voie
Type de ballast	Ballast concassé (granite ou quartzite)
Épaisseur de ballast (sous la traverse)	300 mm (pleine voie)
Type d'attache	type Vossloh
Dévers maximal	160 mm (Vp = 220 km/h)

IV5 Description du tracé

Le tracé du tronçon étudié suit globalement la direction nord-sud en s'adaptant à la topographie locale. Il comprend des alignements droits, des courbes circulaires et des raccordements progressifs (clothoïdes). Les principales contraintes identifiées sur le tracé sont :

- Franchissement de plusieurs oueds à caractère torrentiel (crues éphémères)
- Présence de réseaux existants (conduites de gaz, lignes EAU et FO)
- Zones d'ensablement actif nécessitant des protections spéciales
- Implantation de la gare de Moulay Lahcen au PK 418+200

IV6 Conclusion

Le projet de la ligne ferroviaire Aïn Salah PK 410+500 – PK 427+329 constitue un maillon essentiel dans le développement du réseau ferroviaire du Grand Sud algérien. Les caractéristiques retenues pour une vitesse de 220 km/h imposent des exigences géométriques et mécaniques élevées qui seront détaillées dans les chapitres suivants.

CHAPITRE V : SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE

CHAPITRE V : SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE

V1 Introduction

La superstructure de la voie ferrée désigne l'ensemble des éléments posés sur la plateforme (infrastructure). Elle comprend le rail, les traverses, les attaches et l'appareillage de voie. Pour une ligne à grande vitesse de 220 km/h, ces composants doivent répondre à des critères sévères de résistance, de stabilité et de confort.

V2 Le Rail

V21 Fonction et profil du rail

Le rail assure simultanément la fonction de roulement des roues et le guidage latéral du véhicule. Pour le présent projet, le rail retenu est le rail UIC 60 E1 (anciennement dénommé 60 E1), dont les caractéristiques sont :

Tableau V.1 : Caractéristiques géométriques et mécaniques du profil de rail UIC 60 E1

Caractéristique	Valeur
Désignation	Rail UIC 60 E1
Masse linéaire	60,34 kg/m
Hauteur du rail	172 mm
Largeur du champignon	72 mm
Largeur du patin	150 mm
Épaisseur de l'âme	16,5 mm
Section transversale	7 686 mm ²
Moment d'inertie I _x	3 054 cm ⁴
Module résistant W _x	335,5 cm ³
Acier	R260 – Résistance minimale 900 MPa

V22 Assemblage des rails – Rail Soudé en Long (RSL)

Pour les lignes à grande vitesse, on utilise obligatoirement le Rail Soudé en Long (RSL) afin d'éliminer les joints et assurer un roulement silencieux et confortable. La soudure est réalisée par la technique aluminothermique ou par procédé électrique (soudure en bout).

Les conditions de pose du RSL doivent garantir une température de pose dans la plage de tension nulle :

Tableau V.2 : Paramètres et plages de température pour la pose du Rail Soudé en Long (RSL)

Paramètre	Valeur
Température de neutralisation (T_n)	[30 °C]
Plage de température de pose	$T_n \pm 5^\circ\text{C}$
Température minimale de pose	$T_n - 5 = 25^\circ\text{C}$
Température maximale de pose	$T_n + 5 = 35^\circ\text{C}$

V23 Inclinaison des rails

Les rails sont inclinés vers l'intérieur de la voie avec une pente de 1/20 (soit 1/40 selon les normes UIC récentes pour LGV) afin de mieux répartir les efforts de contact roue/rail.

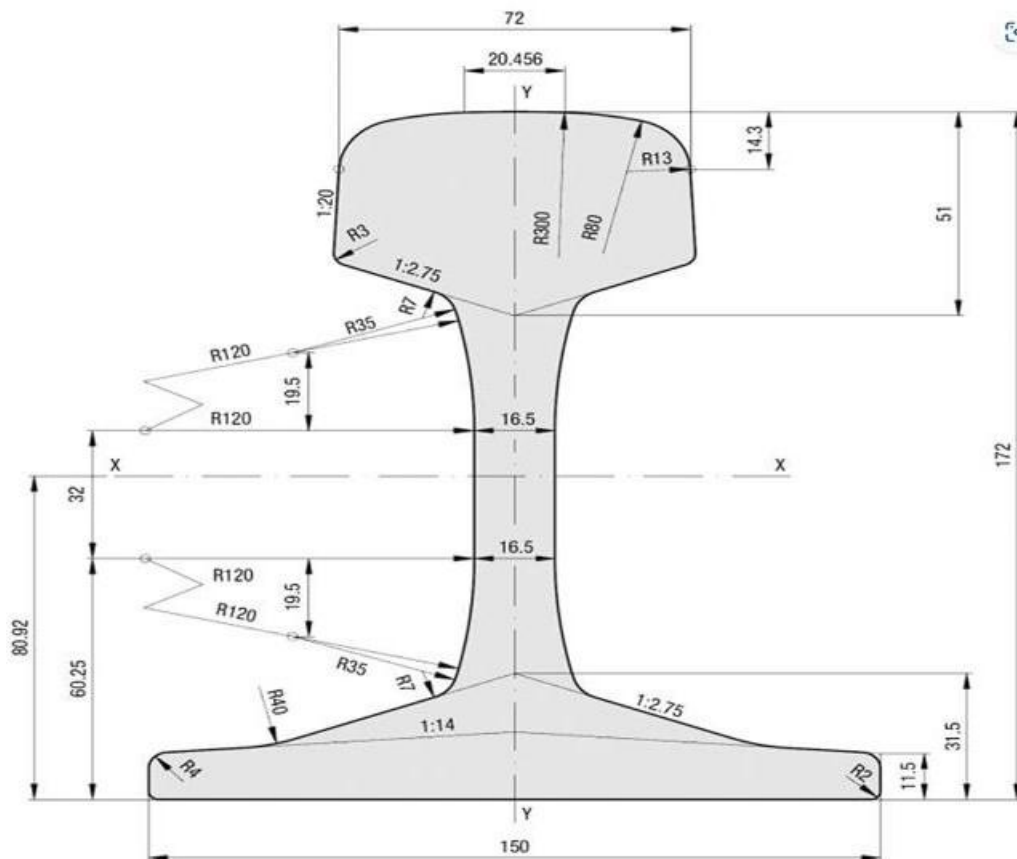


Figure V-1 Profil rail du type UIC60 E1

V3 Les Traverses

IV.3.1 Rôle des traverses

Les traverses assurent le maintien de l'écartement de la voie, la transmission des charges verticales et horizontales vers le ballast et l'ancrage des rails.

V32 Traverses en béton monobloc (type LGV)

Pour une ligne à 220 km/h, les traverses en béton monobloc précontraintes sont imposées. Les caractéristiques retenues sont:

Tableau V.3 : Caractéristiques techniques et paramètres de pose des traverses en béton monobloc

Caractéristique	Valeur
Type	Traverse béton monobloc précontrainte
Longueur	2 240 mm
Masse	~310 kg
Béton	C50/60 – Résistance caractéristique ≥ 50 MPa
Espacement nominal en pleine voie	600 mm
Nombre de traverses par km	1 667 (espacement 600 mm)

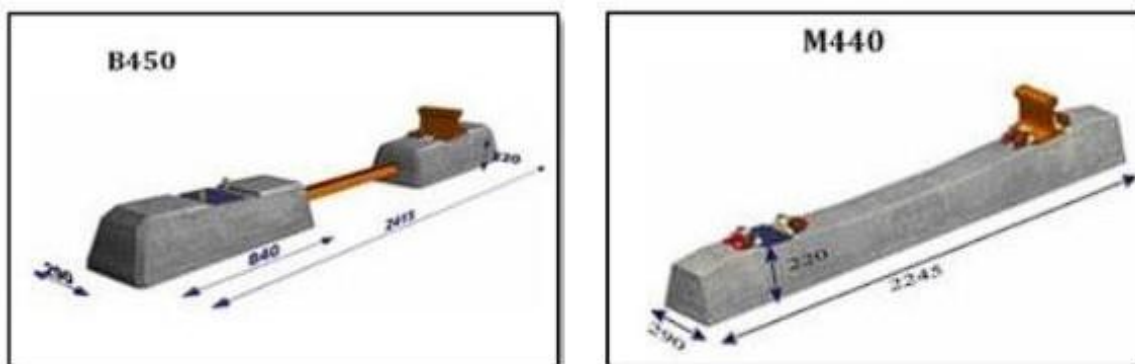


Figure V-2 Les traverses utilisées dans le projet.

V4 Les Attaches

L'attache assure la liaison rail-traverse. Pour les LGV, on utilise des attaches Vossloh qui garantissent :

- Résistance au déplacement longitudinal (anti-fluage) ≥ 7 kN/attache
- Résistance au retournement du rail

- Isolation électrique entre rail et traverse
- Amortissement des vibrations (semelle sous-rail)

Tableau V.4 : Caractéristiques et spécifications techniques du système d'attaches élastiques du rail

Paramètre	Valeur
Type d'attache	type Vossloh
Effort de serrage nominal	14–20 kN
Résistance longitudinale minimale	7 kN par attache
Épaisseur de semelle sous-rail	7 mm (standard LGV)
Raideur verticale de la semelle	80 kN/mm

**Figure V-3 les types des attaches.**

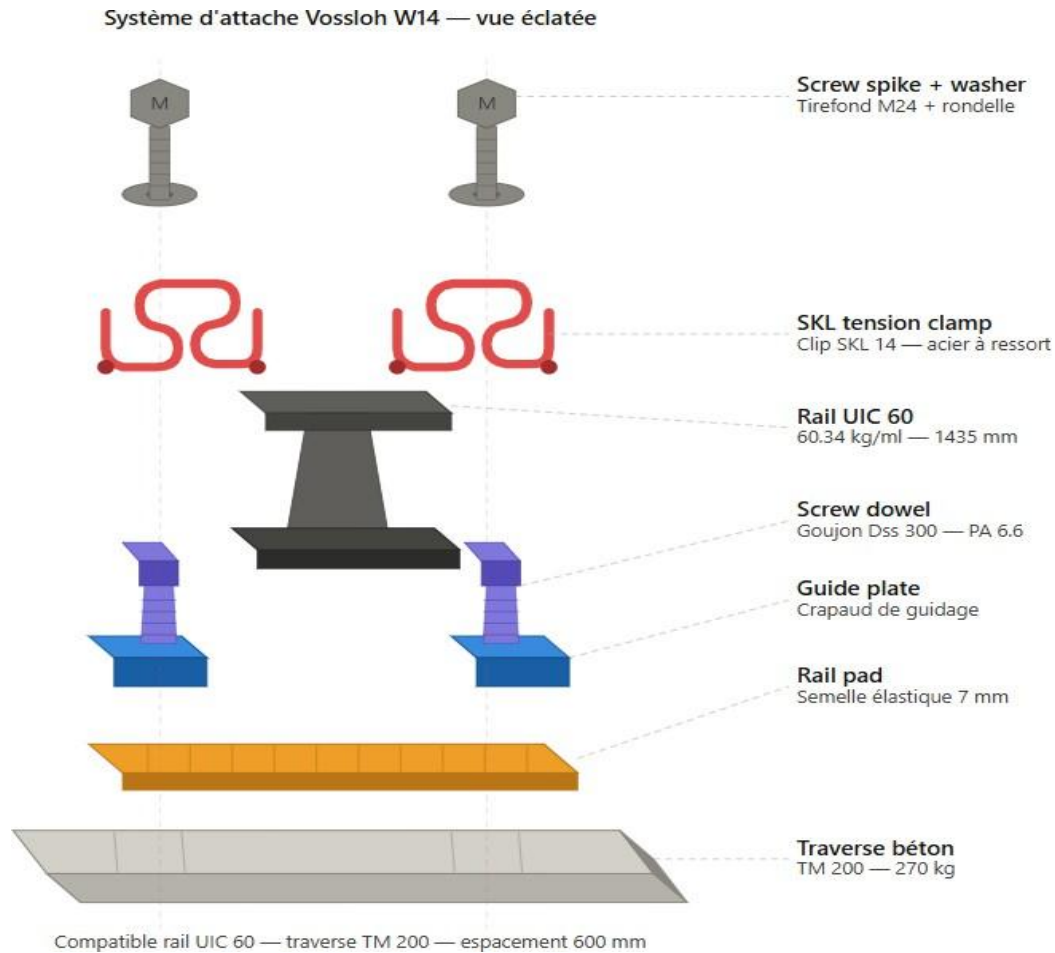


Figure V-4 les composantes d'attache type Vossloh

V5 Le Ballast

Le ballast est la couche granulaire sur laquelle reposent les traverses. Pour une ligne à 220 km/h, les spécifications sont renforcées :

Tableau V.5 : Spécifications et exigences techniques de la couche de ballast (Norme UIC 719R)

Paramètre	Exigence (UIC 719R)
Nature	Roche dure concassée (granite, quartzite, basalte)
Granulométrie	31,5/50 mm (classe A selon EN 13450)
Los Angeles (LA)	$LA \leq 20$
Micro-Deval (MDE)	$MDE \leq 10$

Paramètre	Exigence (UIC 719R)
Coefficient d'Aplatissement (A)	$A \leq 20$
Teneur en fines ($< 0,5$ mm)	$\leq 0,5 \%$
Épaisseur sous traverse (pleine voie)	300 mm minimum
Épaisseur de la couche de bourrage	150 mm minimum

V6 Caractéristiques de la voie du projet

En synthèse, la superstructure retenue pour le tronçon Aïn Salah PK 410+500 – PK 427+329 est :

Tableau V.6 : Synthèse des spécifications retenues pour la superstructure du tronçon In Salah (PK 410+500 – PK 426+000)

Composant	Spécification retenue
Rail	UIC 60 E1 – acier R260 – RSL
Traverse	Béton monobloc précontrainte – L = 2 240 mm
Écartement de voie	1 435 mm
Inclinaison des rails	1/20
Attache	Vossloh
Semelle sous-rail	7 mm – raideur à préciser
Ballast	Roche dure 31,5/50 – classe A – ép. 300 mm
Espacement des traverses	600 mm

V7 Conclusion

La superstructure définie est conforme aux exigences des lignes à grande vitesse pour $V_p = 220$ km/h. Le choix du rail UIC 60 E1 en RSL, des traverses béton monobloc et du ballast classe A garantit un niveau élevé de sécurité, de confort et de durabilité adapté aux conditions climatiques extrêmes de la région d'Aïn Salah.

CHAPITRE VI : TRACE EN PLAN

CHAPITRE VI : TRACE EN PLAN

VI.1 Introduction

Le tracé en plan est la projection horizontale de l'axe de la voie ferrée sur le plan horizontal de référence. Il est composé de trois types d'éléments géométriques : les alignements droits, les arcs de cercle et les courbes de raccordement (clothoïdes). Pour une ligne à 220 km/h, les paramètres géométriques sont fixés par les normes UIC et SNTF afin de garantir la sécurité et le confort des voyageurs.

VI.2 Éléments du Tracé en Plan

VI.2.1 L'alignement droit

L'alignement droit est le segment rectiligne de la voie. Sur cet élément, le dévers est nul ($d = 0$) et les forces centrifuges sont inexistantes. Sa longueur minimale entre deux courbes de sens opposé est fixée par la norme.

VI.2.2 L'arc de cercle

L'arc de cercle est la partie courbe de rayon constant R . Il génère une force centrifuge que l'on compense partiellement par l'application d'un dévers d .

VI.2.3 La courbe de raccordement (Clothoïde)

La clothoïde (ou spirale de Cornu) est une courbe à courbure progressivement variable. Elle assure la transition géométrique entre un alignement droit et un arc de cercle, permettant une variation progressive du dévers et de l'accélération transversale.

L'équation de la clothoïde est : $R \times L = A^2$

Où : R = rayon de courbure, L = longueur de l'arc de clothoïde, A = paramètre de la clothoïde.

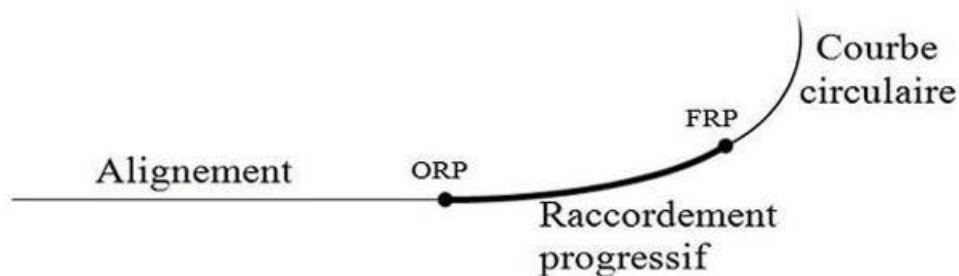


Figure VI-1 Éléments géométriques du tracé en plan

VI.3 Paramètres de Base**Tableau VI.1 : Paramètres fondamentaux et critères de conception géométrique du tracé en plan**

Paramètre	Symbole	Valeur normale	Valeur except.	Source
Vitesse maximale	V _p	220 km/h	—	SNTF
Vitesse minimale (fret)	V _{min}	100 km/h	—	SNTF
Coefficient de dévers	c	300	—	Données projet
Dévers maximal	D _{max}	160 mm	180 mm	Données projet
Insuffisance de dévers	I _{max}	150 mm	160 mm	Données projet
Excès de dévers	E _{max}	110 mm	130 mm	Données projet
Variation dd/dt	dd/dt	50 mm/s	—	UIC 703 Tab.
Variation dI/dt	dI/dt	75 mm/s	—	UIC 703 Tab.
Écartement de voie	e	1 435 mm	—	UIC 505

VI.4 Formules de Calcul**Figure VI-2 Définition du Dévers**

VI.4.1 Dévers pratique d_p

$$d_p \text{ (mm)} = \frac{(1000 \times c)}{R} = \frac{(1000 \times 300)}{R} = \frac{300\,000}{R}$$

VI.4.2 Dévers théorique d_{th}

$$d_{th} \text{ (mm)} = \frac{11,8 \times V_p^2}{R} [V_p \text{ en km/h, } R \text{ en m}]$$

VI.4.3 Insuffisance de dévers I

$$I \text{ (mm)} = d_{th}(V_p) - d_p \leq I_{\text{max}_n} = 150 \text{ mm}$$

VI.4.4 Excès de dévers E

$$E \text{ (mm)} = d_p - d_{th}(V_{\min}) = \frac{d_p - 11,8 \times V_{\min}^2}{R} \leq E_{\text{max}_n} = 110 \text{ mm}$$

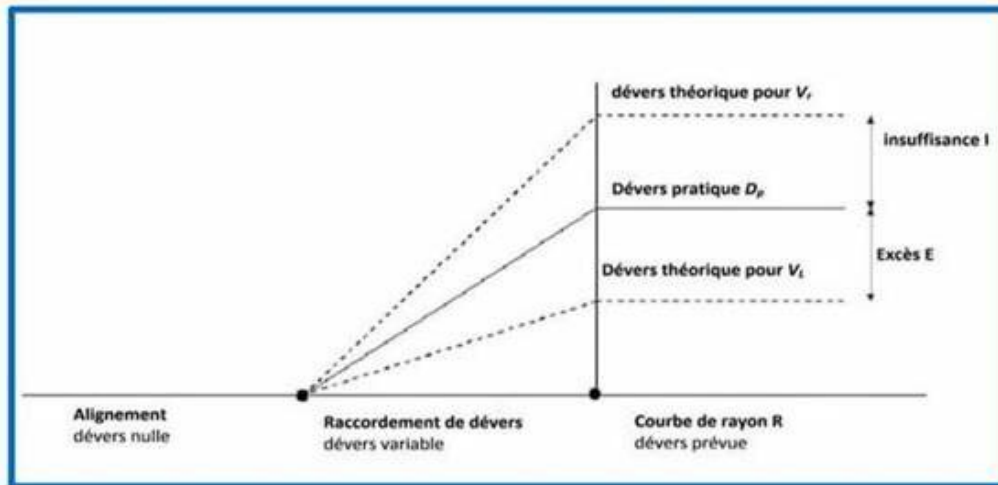


Figure VI-3 Schéma de raccordement de dévers

VI.4.5 Longueur minimale de clothoïde

Critère	Formule	Limite	Signification
C1 – Variation dI/dt	$L_{min_1} = V_p \times I / (3,6 \times 70)$	$dI/dt \leq 75 \text{ mm/s}$	Confort transversal
C2 – Variation dd/dt	$L_{min_2} = dp \times V_p / (3,6 \times 35)$	$dd/dt \leq 50 \text{ mm/s}$	Stabilité dynamique
C3 – L_{min}	Normal=40m	Exeptionnelle=30m	SNTF

VI.5 Calcul du Rayon Minimal R_{min} **VI.5.1 Formule**

$$R_{min} = \frac{11,8 \times V_p^2}{(D_{max} + I_{max})} \text{ [m]}$$

VI.5.2 Application numérique

Cas	D_{max}	I_{max}	Calcul	$R_{min} \text{ (m)}$	Retenu
Normale	160 mm	150 mm	$11,8 \times 48400 / (160 + 150)$ $= 571\,120 / 310$	1 842,32 m	1 850 m

Contrainte fret – R_{max} (excès de dévers E) :

$$R_{max} = \frac{11,8 \times V_{min}^2}{(D_{max} - E_{max})} = \frac{11,8 \times 10\,000}{(160 - 110)} = \frac{118\,000}{50} = 2\,360 \text{ m}$$

★ R_{min} retenu (normale) = 1 850 m

★ R_{min} retenu (exceptionnelle) = 1 700 m

★ **Rmax (contrainte fret) = 2 360 m**

Tous les rayons C1–C6 $\geq 2\,150\text{ m} \rightarrow R \geq R_{\min} = 1\,850\text{ m} \checkmark$

VI.6 Calculs Détaillés par Courbe

Courbe C1 – R = 2300 m

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
1	Dévers pratique d_p	$d_p = \frac{300\,000}{R}$	$\frac{300\,000}{2300}$	140 mm
2	Dévers théorique d_{th}	$d_{th} = \frac{11,8 \times 220^2}{R}$	$\frac{571\,120}{2300}$	248.31 mm
3	Insuffisance I	$I = d_{th} - d_p$	$248.31 - 140$	108.31 mm
4	Vérif. $I \leq 150\text{ mm}$	$I \leq I_{\max_n}$	$108.31 \leq 150\text{ mm}$	✓ Normale
5	$d_{th}(V_{\min}=100)$	$\frac{11,8 \times 100^2}{R}$	$\frac{118\,000}{2300}$	51.30 mm
6	Excès de dévers E	$E = d_p - d_{th}(100)$	$140 - 51.30$	88.70 mm
7	Vérif. $E \leq 110\text{ mm}$	$E \leq E_{\max_n}$	$88.70 \leq 110\text{ mm}$	✓ Normale
8	$L_{\min_1} \left(\frac{dl}{dt} \leq 75 \right)$	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times 75)}$	$\frac{220 \times 108.31}{270}$	88.25 m
9	$L_{\min_2} \left(\frac{dd}{dt} \leq 50 \right)$	$\frac{d_p \times 220}{(3,6 \times 50)}$	$\frac{140 \times 220}{180}$	171.11 m
10	$L_{\min_3}$ (géom. V/2)	$\frac{220}{2}$	—	110 m

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
11	$L_{rp} =$	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times 50)}$	→ arrondi 5m sup	180 m [C2]
12	$A = \sqrt{R \times L_{min}}$	$\sqrt{(2300 \times 180)}$	$\sqrt{(414000)}$	643.42 m
13	Vérif. $\frac{dd}{dt} \leq 50$	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times L_{min})}$	$\frac{140 \times 220}{(3,6 \times 180)} = 47.53$	✓ ≤ 50 mm/s
14	Vérif. $\frac{dI}{dt} \leq 75$	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times L_{min})}$	$\frac{220 \times 108.31}{(3,6 \times 180)} = 36.77$	✓ ≤ 75 mm/s
15	Vérif. $R \geq R_{min}$	$R \geq 1\,850$ m ?	$2300 \geq 1\,850$ m	✓ Conforme

COURBE C1 | R = 2300 m | dp = 140 mm | I = 108.31 mm ✓ | E = 88.70 mm ✓
Lrp = 180 m | A = 643.42 m | dd/dt = 47.53 mm/s ✓ | dI/dt = 36.77 mm/s ✓

Courbe C2 – R = 2400 m

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
1	Dévers pratique dp	$dp = \frac{300\,000}{R}$	$\frac{300\,000}{2400}$	125.00 mm
2	Dévers théorique dth	$d_{th} = \frac{11,8 \times 220^2}{R}$	$\frac{571\,120}{2400}$	237.97 mm
3	Insuffisance I	$I = dth - dp$	$237.97 - 125.00$	112.97 mm
4	Vérif. $I \leq 150$ mm	$I \leq I_{max_n}$?	$112.97 \leq 150$ mm	✓ Normale
5	dth(Vmin=100)	$\frac{11,8 \times 100^2}{R}$	$\frac{118\,000}{2400}$	49.17 mm

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
6	Excès de dévers E	$E = dp - dth(100)$	$125.00 - 49.17$	75.83 mm
7	Vérif. $E \leq 110$ mm	$E \leq E_{max_n} ?$	$75.83 \leq 110$ mm	✓ Normale
8	$Lmin_1 \left(\frac{dl}{dt} \leq 75 \right)$	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times 75)}$	$\frac{220 \times 112.97}{270}$	92.05 m
9	$Lmin_2 \left(\frac{dd}{dt} \leq 50 \right)$	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times 50)}$	$\frac{125.00 \times 220}{180}$	152.77 m
10	$Lmin_3$ (géom. V/2)	$\frac{220}{2}$	—	110 m
11	Lrp	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times 50)}$	→ arrondi 5m sup	160 m
12	$A = \frac{1}{\sqrt{(R \times Lmin)}}$	$\sqrt{(2400 \times 160)}$	$\sqrt{(384000)}$	619.67 m
13	Vérif. $\frac{dd}{dt} \leq 50$	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times Lmin)}$	$\frac{125.00 \times 220}{(3,6 \times 160)} = 47.74$	✓ ≤ 50 mm/s
14	Vérif. $\frac{dl}{dt} \leq 75$	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times Lmin)}$	$\frac{220 \times 112.97}{(3,6 \times 160)} = 43.14$	✓ ≤ 75 mm/s
15	Vérif. $R \geq Rmin$	$R \geq 1\,850$ m ?	$2400 \geq 1\,850$ m	✓ Conforme

COURBE C2 | R = 2400 m | dp = 125.00 mm | I = 112.97 mm ✓ | E = 75.83 mm ✓

Lmin = 160 m | A = 619.67 m | $\frac{dd}{dt} = 47.74$ mm/s ✓ | $\frac{dl}{dt} = 43.47$ mm/s ✓

Courbe C3 – R = 3600 m

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
1	Dévers pratique dp	$dp = \frac{300\,000}{R}$	$\frac{300\,000}{3600}$	90 mm
2	Dévers théorique d_th	$dth = \frac{11,8 \times 220^2}{R}$	$\frac{571\,120}{3600}$	158.64 mm
3	Insuffisance I	$I = dth - dp$	$158.64 - 90$	68.64 mm
4	Vérif. $I \leq 150$ mm	$I \leq I_{max_n} ?$	$68.64 \leq 150$ mm	✓ Normale
5	dth(Vmin=100)	$\frac{11,8 \times 100^2}{R}$	$\frac{118\,000}{3600}$	32.78 mm
6	Excès de dévers E	$E = dp - dth(100)$	$90 - 32.78$	57.22 mm
7	Vérif. $E \leq 110$ mm	$E \leq E_{max_n} ?$	$57.22 \leq 110$ mm	✓ Normale
8	Lmin ₁ (dI/dt ≤ 75)	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times 75)}$	$\frac{220 \times 68.64}{270}$	55.93 m
9	Lmin ₂ (dd/dt ≤ 50)	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times 50)}$	$\frac{90 \times 220}{180}$	110 m
10	Lmin ₃ (géom. V/2)	$\frac{220}{2}$	—	110 m
11	Lrp	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times 50)}$	→	110 m [C2]
12	$A = \sqrt{(R \times Lmin)}$	$\sqrt{(3600 \times 110)}$	$\sqrt{(396000)}$	629.28 m
13	Vérif. dd/dt ≤ 35	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times Lmin)}$	$\frac{90 \times 220}{(3,6 \times 110)} = 50$	✓ ≤ 50 mm/s
14	Vérif. dI/dt ≤ 70	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times Lmin)}$	$\frac{220 \times 68.64}{(3,6 \times 110)} = 38.13$	✓ ≤ 75 mm/s

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
15	Vérif. $R \geq R_{min}$	$R \geq 1\,850\text{ m} ?$	$3600 \geq 1\,850\text{ m}$	✓ Conforme

COURBE C3	 	R = 3600 m	 	dp = 90 mm	 	I = 68.64 mm ✓	 	E = 57.22 mm ✓
Lmin = 110 m	 	A = 629.28 m	 	$\frac{dd}{dt} = 50\text{ mm/s} \checkmark$	 	$\frac{dl}{dt} = 38.13\text{ mm/s} \checkmark$		

Courbe C4 – R = 4000 m

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
1	Dévers pratique dp	$dp = \frac{300\,000}{R}$	$\frac{300\,000}{4000}$	75.00 mm
2	Dévers théorique dth	$dth = \frac{11,8 \times 220^2}{R}$	$\frac{571\,120}{4000}$	142.78 mm
3	Insuffisance I	$I = dth - dp$	$142.78 - 75.00$	67.78 mm
4	Vérif. $I \leq 150\text{ mm}$	$I \leq I_{max_n} ?$	$67.78 \leq 150\text{ mm}$	✓ Normale
5	d_th(Vmin=100)	$\frac{11,8 \times 100^2}{R}$	$\frac{118\,000}{4000}$	29.50 mm
6	Excès de dévers E	$E = dp - dth(100)$	$75.00 - 29.50$	45.50 mm
7	Vérif. $E \leq 110\text{ mm}$	$E \leq E_{max_n} ?$	$45.50 \leq 110\text{ mm}$	✓ Normale
8	Lmin ₁ (dl/dt≤75)	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times 75)}$	$\frac{220 \times 67.78}{270}$	55.23 m

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
9	L_{min_2} ($dd/dt \leq 50$)	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times 50)}$	$\frac{75.00 \times 220}{180}$	91.66 m
10	L_{min_3} (géom. V/2)	$\frac{220}{2}$	—	110 m
11	L_{rp}	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times 50)}$	→	100 m
12	$A = \sqrt{(R \times L_{min})}$	$\sqrt{(4000 \times 100)}$	$\sqrt{(400000)}$	632.45 m
13	Vérif. $dd/dt \leq 50$	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times L_{min})}$	$\frac{75.00 \times 220}{(3,6 \times 100)} = 45.83$	✓ ≤ 50 mm/s
14	Vérif. $dl/dt \leq 75$	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times L_{min})}$	$\frac{220 \times 67.78}{(3,6 \times 100)} = 41.42$	✓ ≤ 75 mm/s
15	Vérif. $R \geq R_{min}$	$R \geq 1\,850$ m ?	$4000 \geq 1\,850$ m	✓ Conforme

COURBE C4 | R = 4000 m | dp = 75.00 mm | I = 67.78 mm ✓ | E = 45.50 mm ✓

$L_{min} = 100$ m | $A = 632.45$ m | $\frac{dd}{dt} = 45.83$ mm/s ✓ | $\frac{dl}{dt} = 41.42$ mm/s ✓

Courbe C5 – R = 2150 m

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
1	Dévers pratique dp	$dp = \frac{300\,000}{R}$	$\frac{300\,000}{2150}$	140 mm
2	Dévers théorique dth	$dth = \frac{11,8 \times 220^2}{R}$	$\frac{571\,120}{2150}$	265.64 mm

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
3	Insuffisance I	$I = dth - dp$	$265.64 - 140$	125.64 mm
4	Vérif. $I \leq 150$ mm	$I \leq I_{\max_n} ?$	$125.64 \leq 150$ mm	✓ Normale
5	dth(Vmin=100)	$\frac{11,8 \times 100^2}{R}$	$\frac{118\,000}{2150}$	54.88 mm
6	Excès de dévers E	$E = dp - dth(100)$	$140 - 54.88$	85.12 mm
7	Vérif. $E \leq 110$ mm	$E \leq E_{\max_n} ?$	$85.12 \leq 110$ mm	✓ Normale
8	$L_{\min_1}$ ($dI/dt \leq 75$)	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times 75)}$	$\frac{220 \times 125.64}{270}$	102.37 m
9	$L_{\min_2}$ ($dd/dt \leq 50$)	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times 50)}$	$\frac{140 \times 220}{180}$	171.11 m
10	$L_{\min_3}$ (géom. V/2)	$\frac{220}{2}$	—	110 m
11	Lrp	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times 50)}$	→ arrondi 5m sup	180m [C2]
12	$A = \sqrt{R \times L_{\min}}$	$\sqrt{(2150 \times 180)}$	$\sqrt{(387000)}$	622.09 m
13	Vérif. $dd/dt \leq 50$	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times L_{\min})}$	$\frac{140 \times 220}{(3,6 \times 180)} = 47.53$	✓ ≤ 50 mm/s
14	Vérif. $dI/dt \leq 75$	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times L_{\min})}$	$\frac{220 \times 125.64}{(3,6 \times 180)} = 42.65$	✓ ≤ 75 mm/s
15	Vérif. $R \geq R_{\min}$	$R \geq 1\,850$ m ?	$2150 \geq 1\,850$ m	✓ Conforme

COURBE C5 | R = 2150 m | dp = 140 mm | I = 125.64 mm ✓ | E = 85.12 mm ✓

$$L_{\min} = 180 \text{ m} \quad | \quad A = 622.09 \text{ m} \quad | \quad \frac{dd}{dt} = 47.53 \text{ mm/s} \checkmark \quad | \quad \frac{dl}{dt} = 42.65 \text{ mm/s} \checkmark$$

Courbe C6 – R = 2700 m

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
1	Dévers pratique d_p	$d_p = \frac{300\,000}{R}$	$\frac{300\,000}{2700}$	120 mm
2	Dévers théorique d_{th}	$d_{th} = \frac{11,8 \times 220^2}{R}$	$\frac{571\,120}{2700}$	211.53 mm
3	Insuffisance I	$I = d_{th} - d_p$	$211.53 - 120$	91.53 mm
4	Vérif. $I \leq 150$ mm	$I \leq I_{\max_n} ?$	$91.53 \leq 150 \text{ mm}$	✓ Normale
5	$d_{th}(V_{\min}=100)$	$\frac{11,8 \times 100^2}{R}$	$\frac{118\,000}{2700}$	43.70 mm
6	Excès de dévers E	$E = d_p - d_{th}(100)$	$120 - 43.70$	76.30 mm
7	Vérif. $E \leq 110$ mm	$E \leq E_{\max_n} ?$	$76.30 \leq 110 \text{ mm}$	✓ Normale
8	$L_{\min_1}$ ($dI/dt \leq 75$)	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times 75)}$	$\frac{220 \times 91.53}{270}$	74.58 m
9	$L_{\min_2}$ ($dd/dt \leq 50$)	$\frac{d_p \times 220}{(3,6 \times 50)}$	$\frac{120 \times 220}{180}$	146.66 m
10	$L_{\min_3}$ (géom. $V/2$)	$\frac{220}{2}$	—	110 m
11	L_{rp}	$\frac{d_p \times 220}{(3,6 \times 50)}$	→ arrondi 5m sup	150 m [C2]
12	$A = \sqrt{R \times L_{\min}}$	$\sqrt{(2700 \times 150)}$	$\sqrt{(567000)}$	636.40 m

N°	Étape	Formule	Calcul détaillé	Résultat
13	Vérif. $dd/dt \leq 50$	$\frac{dp \times 220}{(3,6 \times L_{min})}$	$\frac{120 \times 220}{(3,6 \times 150)} = 48.88$	$\checkmark \leq 50 \text{ mm/s}$
14	Vérif. $dI/dt \leq 75$	$\frac{220 \times I}{(3,6 \times L_{min})}$	$\frac{220 \times 91.53}{(3,6 \times 150)} = 37.29$	$\checkmark \leq 75 \text{ mm/s}$
15	Vérif. $R \geq R_{min}$	$R \geq 1\,850 \text{ m} ?$	$2700 \geq 1\,850 \text{ m}$	$\checkmark$ Conforme

COURBE C6 R = 2700 m dp = 120 mm I = 91.53 mm $\checkmark$ E = 76.30 mm $\checkmark$ Lmin = 150 m A = 636.40 m $\frac{dd}{dt} = 48.88 \text{ mm/s } \checkmark$ $\frac{dI}{dt} = 37.29 \text{ mm/s } \checkmark$													
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

VI.7 Tableau Récapitulatif des 6 Courbes

Courbe	R (m)	dp (mm)	d_th (mm)	I (mm)	E (mm)	Lmi n ₁ (m)	Lmi n ₂ (m)	Lm in (m)	A (m)	dd/dt (mm/s)	dI/dt (mm/s)	Vér if. I	Vér if. E
C1	2300	140	248.31	108.31	88.70	94.56	244.44	180	643.42	47.53	36.77	$\checkmark$	$\checkmark$
C2	2400	125.00	237.97	112.97	75.83	98.62	218.25	160	619.67	47.74	43.47	$\checkmark$	$\checkmark$
C3	3600	90	158.64	68.64	57.22	59.93	157.14	110	629.28	50	38.13	$\checkmark$	$\checkmark$
C4	4000	75.00	142.78	67.78	45.50	59.17	130.95	100	632.83	45.83	41.42	$\checkmark$	$\checkmark$
C5	2150	140	265.64	125.64	85.12	109.68	244.44	180	622.09	47.53	42.65	$\checkmark$	$\checkmark$
C6	2700	120	211.53	91.53	76.30	79.90	209.52	150	636.40	48.88	47.29	$\checkmark$	$\checkmark$

Toutes les 6 courbes satisfont les conditions normales UIC 703 : $I \leq 150 \text{ mm}$ et $E \leq 110 \text{ mm}$. **Rmin = 1 850 m est respecté pour tous les rayons.**

VI.8 Longueurs Minimales des Éléments du Tracé (SNTF §6.1.4.1)

Élément	Formule	Valeur	Catégorie
Alignement entre courbes même sens	$V / 2 = 220/2$	110 m	Normale
Alignement entre courbes même sens	$V / 3 = 220/3$	73 m	Exceptionnelle
Alignement entre courbes sens contraire	$L_{\min} = q \times V$ ($q = 0,30$; except. $q = 0,22$)	66 m (except. 48,4 m)	Cas C5 (max)
Arc circulaire minimal	$V / 2$	110 m	Normale

VI.9 Conclusion

Le tracé en plan du tronçon Aïn Salah PK 410+500 – PK 427+329 a été conçu et vérifié pour une vitesse de projet de **Vp = 220 km/h** en trafic mixte voyageurs-marchandises. Les calculs basés sur le **Référentiel Technique SNTF** et la **Fiche UIC 703 R** confirment la conformité totale des six courbes :

- Rmin = 1 850 m — tous les rayons (C1 à C6 : 2 150 à 4 000 m) sont conformes ✓
- Insuffisance de dévers I : comprise entre 67,78 mm (C4) et 125,64 mm (C5) — toutes $\leq 150 \text{ mm}$ ✓
- Excès de dévers E : compris entre 45,50 mm (C4) et 85,12 mm (C5) — toutes $\leq 110 \text{ mm}$ ✓
- Longueurs de clothoïdes : de 100 m (C4) à 180 m (C5), critère dominant $dd/dt \leq 50 \text{ mm/s}$
- Paramètre A : stabilisé autour de 618–644 m pour toutes les courbes
- Vérifications dd/dt : 47.53 à 50 mm/s $\leq 50 \text{ mm/s}$ ✓ (marges très serrées = calcul optimal)
- Vérifications dI/dt : 36.77 à 47.92 mm/s $\leq 75 \text{ mm/s}$ ✓

CHAPITRE VII: PROFIL EN LONG

CHAPITRE VII: PROFIL EN LONG

VII.1 Introduction

Le profil en long est la représentation graphique de la coupe verticale de l'axe de la voie suivant sa direction de développement. Il représente simultanément le **terrain naturel (TN)** et le **projet (VP)**, permettant ainsi de visualiser et calculer les déblais, remblais, déclivités et raccordements verticaux du tronçon.

Pour la ligne ferroviaire Aïn Salah **PK 410+500 → PK 427+329**, le profil en long a été tracé sous **AutoPISTE / AutoCAD**). Il comporte **9 pentes/rampes uniformes** reliées par **8 raccordements verticaux circulaires**, alternant RVC (raccordement en creux) et RVS (raccordement en sommet).

Le profil longitudinal est défini par la projection horizontale de la cote de la file basse des rails sur un plan vertical passant par l'axe du tracé (Référentiel SNTF Chapitre 6 §6.1.5).

VII.2 Définitions et Éléments du Profil en Long

VII.2.1 Les déclivités

La déclivité est l'inclinaison de la voie par rapport à l'horizontale. Elle est exprimée en ‰ (millièmes). On distingue :

- **La rampe (↗) :** déclivité positive — la voie monte dans le sens de la progression
- **La pente (↘) :** déclivité négative — la voie descend dans le sens de la progression
- **Le palier (→) :** déclivité nulle ou quasi-nulle

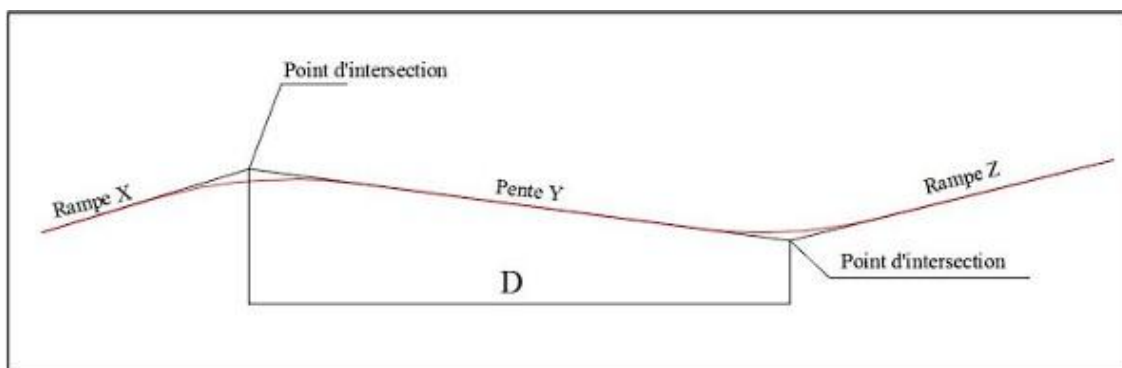


Figure VII-1 Éléments géométriques du profil en long.

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

VII.2.2 Les raccordements verticaux

Aux changements de déclivité, on réalise des raccordements paraboliques de rayon R_v . On distingue deux types :

- **RVC – Raccordement en creux (concave $\cup$)** : $R_v > 0 \rightarrow$ transition d'une pente vers une rampe
- **RVS – Raccordement en sommet (convexe $\cap$)** : $R_v < 0 \rightarrow$ transition d'une rampe vers une pente

Le raccordement vertical est caractérisé par son Point d'Intersection Vertical (PIV), intersection géométrique des deux droites de déclivité, et par la longueur du raccordement (LH), répartie symétriquement de part et d'autre du PIV.

$$a_v = V^2_{\max} / (12,96 \times |R_v|) \quad [a_v \text{ en m/s}^2, V \text{ en km/h, } R_v \text{ en m}] \quad a_{v_max} \leq 0,22 \text{ m/s}^2 \text{ (normale)} \quad a_{v_max} \leq 0,31 \text{ m/s}^2 \text{ (exceptionnelle)}$$

VII.3 Paramètres et Normes de Référence

Les paramètres du profil en long sont fixés conformément au **Référentiel Technique SNTF Chapitre 6 §6.1.5** pour $V_p = 220 \text{ km/h}$:

VII.3.1 Déclivité maximale admissible (SNTF §6.1.5.1)

Tableau VII.1 : Limites admissibles de la déclivité maximale en fonction de la longueur de la rampe

Longueur de la déclivité	Déclivité max normale	Déclivité max exceptionnelle
$L < 3\,000 \text{ m}$	16 ‰	18 ‰
$3\,000 \text{ m} \leq L \leq 15\,000 \text{ m}$	16 ‰ $\rightarrow$ 13 ‰ (variable)	18 ‰ $\rightarrow$ 15 ‰ (variable)
$L > 15\,000 \text{ m}$	13 ‰	15 ‰
En gare (zone d'arrêt)	2,5 ‰	2,5 ‰

VII.3.2 Rayon vertical minimal admissible (SNTF §6.1.5.2)

Les rayons minimaux sont calculés pour limiter l'accélération verticale à la vitesse maximale :

$$R_{v_min} = V_p^2 / (3,6^2 \times a_{v_max}) \rightarrow R_{v_min} \text{ normal} = 0,35 \times V_p^2 \quad | \quad R_{v_min} \text{ except.} = 0,25 \times V_p^2$$

Tableau VII.2: Calcul des rayons minimaux admissibles en profil en long pour le raccordement vertical

Type	Formule	Calcul	Valeur	Limite av
Normale	$0,35 \times V^2p$	$0,35 \times 220^2$	Rv_min = 16 940 m	$av \leq 0,22 \text{ m/s}^2$
Exceptionnelle	$0,25 \times V^2p$	$0,25 \times 220^2$	Rv_min = 12 100 m	$av \leq 0,31 \text{ m/s}^2$

VII.3.3 Longueurs minimales (SNTF §6.1.5.3)**Tableau VII.3 : Calcul des longueurs minimales des déclivités et des raccordements verticaux**

Élément	Formule	Calcul	Valeur
Longueur min déclivité (normale)	$V / 2$	$220 / 2$	110 m
Longueur min déclivité (except.)	$V / 2,5$	$220 / 2,5$	88 m
Longueur min raccordement vertical	—	Fixe	30 m

Tableau VII.4 : Tableau récapitulatif des paramètres de conception géométrique en profil en long

Paramètre	Symbole	Normale	Exceptionnelle	Source
Vitesse de projet	Vp	220 km/h	—	SNTF §6.1.2
Déclivité max (L < 3 000 m)	p_max	16 ‰	18 ‰	SNTF §6.1.5.1
Déclivité max (L > 15 000 m)	p_max	13 ‰	15 ‰	SNTF §6.1.5.1
Rayon vertical min	Rv_min	16 940 m	12 100 m	SNTF §6.1.5.2
Accélération verticale max	av_max	0,22 m/s²	0,31 m/s ²	SNTF §6.1.5.2
Longueur min déclivité	Lmin	110 m	88 m	SNTF §6.1.5.3

Longueur min raccordement	Lrc_min	30 m	—	SNTF §6.1.5.3
------------------------------	---------	------	---	---------------

VII.4 Description Générale du Profil en Long

Le terrain de la région d'Aïn Salah est caractérisé par un relief **globalement peu accidenté à légèrement ondulé**, typique des regs sahariens. Le profil en long du tronçon PK 410+500 – PK 427+329 présente un profil montant-descendant avec un plateau central autour de PK 418+200 – PK 419+730 (cote $\approx$ 916,826 m NGF).

DESCRIPTION DU PROFIL EN LONG – PK 410+500 → PK 427+329
• PK 410+500 → 410+670 : Rampe légère ↗ (+4,20 ‰) — montée douce initiale
• PK 410+670 → 410+936 : RVS (sommet) Rv = -18 000 m — premier point haut
• PK 410+936 → 411+181 : Pente ↘ (-10,50 ‰) — descente vers le creux
• PK 411+181 → 411+515 : RVC (creux) Rv = +18 000 m — transition vers remontée
• PK 411+515 → 412+426 : Rampe ↗ (+8,10 ‰) — montée progressive sur 910 m
• PK 412+426 → 412+547 : RVC (creux) Rv = +50 000 m — inflexion très douce
• PK 412+547 → 413+085 : Rampe ↗ (+10,50 ‰) — montée soutenue sur 538 m
• PK 413+085 → 413+237 : RVS (sommet) Rv = -20 000 m — inflexion haute
• PK 413+237 → 415+391 : Rampe ↗ (+2,90 ‰) — montée douce sur 2 154 m
• PK 415+391 → 415+527 : RVC (creux) Rv = +22 000 m — raccordement creux
• PK 415+527 → 416+586 : Rampe ↗ (+9,10 ‰) — montée soutenue sur 1 059 m
• PK 416+586 → 416+720 : RVS (sommet) Rv = -30 000 m — inflexion sommet
• PK 416+720 → 418+190 : Rampe ↗ (+4,60 ‰) — montée finale sur 1 469 m
• PK 418+190 → 418+306 : RVS (sommet) Rv = -25 000 m — point haut plateau
• PK 418+190 → 419+730 : Palier quasi-horizontal (0,00 ‰) — zone de plateau sur 1 325 m

- PK 419+630 → 419+769 : RVS (sommet) $R_v = -30\ 000\text{ m}$ — début de la descente finale
- PK 419+769 → 427+330 : Pente $\searrow$ ($-4,60\text{ ‰}$) — descente régulière sur 7 561 m

VII.5 Calculs Détaillés des Éléments du Profil en Long

VII.5.1 Calcul des Déclivités

$$p (\text{‰}) = (Z_2 - Z_1) / L \times 1000 \quad [\text{Rampe : } p > 0 \quad | \quad \text{Pente : } p < 0]$$

Se g.	Type	PK début	PK fin	Z_1 (m)	Z_2 (m)	ΔZ (m)	L (m)	p (‰)	$p \leq 16$ ‰	$L \geq 110$ m
1	Ramp e ↗	410+500.0 00	410+670.0 38	879.99 5	880.71 7	+0.72 2	170.03 8	+4.2000 ‰	✓	✓
2	Pente ↘	410+935.5 54	411+180.9 85	879.88 5	877.30 6	- 2.579	245.43 1	- 10.5000 ‰	✓	✓
3	Ramp e ↗	411+515.4 77	412+425.6 24	876.90 0	884.25 0	+7.35 0	910.14 7	+8.1000 ‰	✓	✓
4	Ramp e ↗	412+547.3 78	413+085.0 65	885.38 1	891.03 3	+5.65 2	537.68 7	+10.5000 ‰	✓	✓
5	Ramp e ↗	413+236.8 50	415+390.8 50	892.05 3	898.34 5	+6.29 2	2154.0 00	+2.9000 ‰	✓	✓
6	Ramp e ↗	415+527.1 39	416+586.1 18	899.16 6	908.82 0	+9.65 4	1058.9 79	+9.1000 ‰	✓	✓
7	Ramp e ↗	416+720.4 88	418+189.5 93	909.74 4	916.55 7	+6.81 3	1469.1 06	+4.6000 ‰	✓	✓
8	Palier →	418+190.5 28	419+730.1 77	916.82 6	916.82 6	+0.00 0	1324.6 48	+0.0000 ‰	✓	✓

9	Pente ↘	419+768.7 20	427+329.7 36	916.50 6	881.58 8	- 34.91 8	7561.0 16	- 4.6000‰	✓	✓
---	------------	-----------------	-----------------	-------------	-------------	-----------------	--------------	--------------	---	---

VII.5.2 Calcul des Raccordements Verticaux

L'accélération verticale au franchissement d'un raccordement est calculée par :

$$a_v = V^2_{\max} / (12,96 \times |R_v|) \quad [a_v \text{ en m/s}^2, V_p = 220 \text{ km/h, } R_v \text{ en m}] \rightarrow a_v \leq 0,22 \text{ m/s}^2$$

Raccordement N°1 – Raccordement en sommet (RVS) — | $R_v = -18\,000 \text{ m}$

Paramètre	Formule	Calcul	Résultat	Vérif.
PK du raccordement	—	410+670.038 → 410+935.554	—	—
Longueur LH	$L = PK_{\text{fin}} - PK_{\text{début}}$	410+935.554 – 410+670.038	265.516 m	✓
Rayon vertical $ R_v $	Donné par AutoPISTE	—	18 000 m	✓ Normal
Pente entrante p_1	Seg. précédent	—	+4.2000 ‰	—
Pente sortante p_2	Seg. suivant	—	-10.5000 ‰	—
Variation de pente Δp	$p_2 - p_1$	—	-14.7000 ‰	—
Accel. verticale a_v	$V^2 / (12,96 \times R_v)$	$220^2 / (12,96 \times 18\,000) =$ 48400/233280	0.2075 m/s²	✓ Normal
Vérif. $LH \geq 30 \text{ m}$	$LH \geq L_{\min_rc}$	$265.516 \text{ m} \geq 30 \text{ m}$	LH = 265.516 m	✓

RC 1 (RVS) | $R_v = -18\,000 \text{ m}$ | $LH = 265.516 \text{ m}$ | $a_v = 0.2075 \text{ m/s}^2$ | ✓ Normal

Raccordement N°2 – Raccordement en creux (RVC) — | Rv = +18 000 m

Paramètre	Formule	Calcul	Résultat	Vérif.
PK du raccordement	—	411+180.985 → 411+515.477	—	—
Longueur LH	$L = PK_{fin} - PK_{début}$	411+515.477 – 411+180.985	334.492 m	✓
Rayon vertical Rv	Donné par AutoPISTE	—	18 000 m	✓ Normal
Pente entrante p ₁	Seg. précédent	—	-10.5000 ‰	—
Pente sortante p ₂	Seg. suivant	—	+8.1000 ‰	—
Variation de pente Δp	$p_2 - p_1$	—	+18.6000 ‰	—
Accel. verticale a _v	$V^2/(12,96 \times Rv)$	$220^2/(12,96 \times 18\,000) =$ 48400/233280	0.2075 m/s²	✓ Normal
Vérif. LH ≥ 30 m	$LH \geq L_{min_rc}$	334.492 m ≥ 30 m	LH = 334.492 m	✓

RC 2 (RVC) | Rv = +18 000 m | LH = 334.492 m | a_v = 0.2075 m/s² | ✓ Normal

Raccordement N°3 – Raccordement en creux (RVC) — | Rv = +50 000 m

Paramètre	Formule	Calcul	Résultat	Vérif.
PK du raccordement	—	412+425.624 → 412+547.378	—	—
Longueur LH	$L = PK_{fin} - PK_{début}$	412+547.378 – 412+425.624	121.754 m	✓
Rayon vertical Rv	Donné par AutoPISTE	—	50 000 m	✓ Normal

Pente entrante p_1	Seg. précédent	—	+8.1000 ‰	—
Pente sortante p_2	Seg. suivant	—	+10.5000 ‰	—
Variation de pente Δp	$p_2 - p_1$	—	+2.4000 ‰	—
Accel. verticale a_v	$V^2/(12,96 \times R_v)$	$220^2/(12,96 \times 50\,000) = 48400/648000$	0.0747 m/s²	✓ Normal
Vérif. $LH \geq 30$ m	$LH \geq L_{min_rc}$	$121.754 \text{ m} \geq 30 \text{ m}$	LH = 121.754 m	✓

RC 3 (RVC) | $R_v = +50\,000$ m | $LH = 121.754$ m | $a_v = 0.0747$ m/s² | ✓ Normal

Raccordement N°4 – Raccordement en sommet (RVS) $\curvearrowright$ | $R_v = -20\,000$ m

Paramètre	Formule	Calcul	Résultat	Vérif.
PK du raccordement	—	413+085.065 → 413+236.850	—	—
Longueur LH	$L = PK_{fin} - PK_{début}$	$413+236.850 - 413+085.065$	151.785 m	✓
Rayon vertical $ R_v $	Donné par AutoPISTE	—	20 000 m	✓ Normal
Pente entrante p_1	Seg. précédent	—	+10.5000 ‰	—
Pente sortante p_2	Seg. suivant	—	+2.9000 ‰	—
Variation de pente Δp	$p_2 - p_1$	—	-7.6000 ‰	—
Accel. verticale a_v	$V^2/(12,96 \times R_v)$	$220^2/(12,96 \times 20\,000) = 48400/259200$	0.1867 m/s²	✓ Normal
Vérif. $LH \geq 30$ m	$LH \geq L_{min_rc}$	$151.785 \text{ m} \geq 30 \text{ m}$	LH = 151.785 m	✓

RC 4 (RVS) | $R_v = -20\,000\text{ m}$ | $LH = 151.785\text{ m}$ | $av = 0.1867\text{ m/s}^2$ | ✓ Normal

Raccordement N°5 – Raccordement en creux (RVC) ∩ | $R_v = +22\,000\text{ m}$

Paramètre	Formule	Calcul	Résultat	Vérif.
PK du raccordement	—	415+390.850 → 415+527.139	—	—
Longueur LH	$L = PK_{fin} - PK_{début}$	415+527.139 – 415+390.850	136.289 m	✓
Rayon vertical $ R_v $	Donné par AutoPISTE	—	22 000 m	✓ Normal
Pente entrante p_1	Seg. précédent	—	+2.9000 ‰	—
Pente sortante p_2	Seg. suivant	—	+9.1000 ‰	—
Variation de pente Δp	$p_2 - p_1$	—	+6.2000 ‰	—
Accel. verticale av	$V^2/(12,96 \times R_v)$	$220^2/(12,96 \times 22\,000) =$ 48400/285120	0.1698 m/s²	✓ Normal
Vérif. $LH \geq 30\text{ m}$	$LH \geq L_{min_rc}$	$136.289\text{ m} \geq 30\text{ m}$	LH = 136.289 m	✓

RC 5 (RVC) | $R_v = +22\,000\text{ m}$ | $LH = 136.289\text{ m}$ | $av = 0.1698\text{ m/s}^2$ | ✓ Normal

Raccordement N°6 – Raccordement en sommet (RVS) ∪ | $R_v = -30\,000\text{ m}$

Paramètre	Formule	Calcul	Résultat	Vérif.
PK du raccordement	—	416+586.118 → 416+720.488	—	—

Longueur LH	$L = PK_{fin} - PK_{début}$	$416+720.488 - 416+586.118$	134.370 m	✓
Rayon vertical Rv	Donné par AutoPISTE	—	30 000 m	✓ Normal
Pente entrante p_1	Seg. précédent	—	+9.1000 ‰	—
Pente sortante p_2	Seg. suivant	—	+4.6000 ‰	—
Variation de pente Δp	$p_2 - p_1$	—	-4.5000 ‰	—
Accel. verticale a_v	$V^2/(12,96 \times Rv)$	$220^2/(12,96 \times 30\,000) = 48400/388800$	0.1245 m/s²	✓ Normal
Vérif. $LH \geq 30\text{ m}$	$LH \geq L_{min_rc}$	$134.370\text{ m} \geq 30\text{ m}$	LH = 134.370 m	✓

RC 6 (RVS) | Rv = -30 000 m | LH = 134.370 m | $a_v = 0.1245\text{ m/s}^2$ | ✓ Normal

Raccordement N°7 – Raccordement en sommet (RVS) — | Rv = -25 000 m

Paramètre	Formule	Calcul	Résultat	Vérif.
PK du raccordement	—	$418+189.593 \rightarrow 418+305.528$	—	—
Longueur LH	$L = PK_{fin} - PK_{début}$	$418+305.528 - 418+189.593$	115.935 m	✓
Rayon vertical Rv	Donné par AutoPISTE	—	25 000 m	✓ Normal
Pente entrante p_1	Seg. précédent	—	+4.6000 ‰	—
Pente sortante p_2	Seg. suivant	—	+0.0000 ‰	—
Variation de pente Δp	$p_2 - p_1$	—	-4.6000 ‰	—

Accel. verticale a_v	$V^2/(12,96 \times R_v)$	$220^2/(12,96 \times 25\,000) = 48400/324000$	0.1494 m/s²	✓ Normal
Vérif. $LH \geq 30$ m	$LH \geq L_{min_rc}$	$115.935 \text{ m} \geq 30 \text{ m}$	LH = 115.935 m	✓

RC 7 (RVS) | $R_v = -25\,000$ m | LH = 115.935 m | $a_v = 0.1494 \text{ m/s}^2$ | ✓ Normal

Raccordement N°8 – Raccordement en sommet (RVS) $\curvearrowright$ | $R_v = -30\,000$ m

Paramètre	Formule	Calcul	Résultat	Vérif.
PK du raccordement	—	419+630.177 → 419+768.721	—	—
Longueur LH	$L = PK_{fin} - PK_{début}$	$419+768.721 - 419+630.177$	138.544 m	✓
Rayon vertical $ R_v $	Donné par AutoPISTE	—	30 000 m	✓ Normal
Pente entrante p_1	Seg. précédent	—	+0.0000 ‰	—
Pente sortante p_2	Seg. suivant	—	-4.6000 ‰	—
Variation de pente Δp	$p_2 - p_1$	—	-4.6000 ‰	—
Accel. verticale a_v	$V^2/(12,96 \times R_v)$	$220^2/(12,96 \times 30\,000) = 48400/388800$	0.1245 m/s²	✓ Normal
Vérif. $LH \geq 30$ m	$LH \geq L_{min_rc}$	$138.544 \text{ m} \geq 30 \text{ m}$	LH = 138.544 m	✓

RC 8 (RVS) | $R_v = -30\,000$ m | LH = 138.544 m | $a_v = 0.1245 \text{ m/s}^2$ | ✓ Normal

VII.6 Points d'Intersection Verticaux (PIV)

Les PIV sont les points géométriques d'intersection des droites de déclivité avant et après chaque raccordement vertical. Leurs coordonnées approximatives (centroïde du raccordement) sont :

N° PIV	PK du PIV (approx.)	Rayon Rv (m)	Type	Rv $\geq 16\ 940\text{ m}$
1	410+802.796	18 000	RVS	✓ Normal
2	411+348.231	18 000	RVC	✓ Normal
3	412+486.501	50 000	RVC	✓ Normal
4	413+160.958	20 000	RVS	✓ Normal
5	415+458.994	22 000	RVC	✓ Normal
6	416+653.303	30 000	RVS	✓ Normal
7	418+247.561	25 000	RVS	✓ Normal
8	419+699.449	30 000	RVS	✓ Normal

VII.7 Tableau Récapitulatif – Éléments du Profil en Long

N°	Type	PK début	PK fin	L (m)	p (‰)	Rv (m)	av (m/s ²)	p $\leq 16\text{‰}$	L $\geq 110\text{ m}$	Rv $\geq 16940\text{ m}$
1	RAM PE	410+500.00	410+670.038	170.038	+4.2000‰	—	—	✓	✓	—
1	RVS	410+670.038	410+935.554	265.516	—	18 000	0.2075	—	✓	✓
2	PENTE	410+935.554	411+180.985	245.431	-10.5000‰	—	—	✓	✓	—
2	RVC	411+180.985	411+515.477	334.492	—	18 000	0.2075	—	✓	✓

3	RAM PE	411+515.4 77	412+425.6 24	910.14 7	+8.1000 ‰	—	—	✓	✓	—
3	RVC	412+425.6 24	412+547.3 78	121.75 4	—	50 00 0	0.074 7	—	✓	✓
4	RAM PE	412+547.3 78	413+085.0 65	537.68 7	+10.5000 ‰	—	—	✓	✓	—
4	RVS	413+085.0 65	413+236.8 50	151.78 5	—	20 00 0	0.186 7	—	✓	✓
5	RAM PE	413+236.8 50	415+390.8 50	2154.0 00	+2.9000 ‰	—	—	✓	✓	—
5	RVC	415+390.8 50	415+527.1 39	136.28 9	—	22 00 0	0.169 8	—	✓	✓
6	RAM PE	415+527.1 39	416+586.1 18	1058.9 79	+9.1000 ‰	—	—	✓	✓	—
6	RVS	416+586.1 18	416+720.4 88	134.37 0	—	30 00 0	0.124 5	—	✓	✓
7	RAM PE	416+720.4 88	418+189.5 93	1469.1 06	+4.6000 ‰	—	—	✓	✓	—
7	RVS	418+189.5 93	418+305.5 28	115.93 5	—	25 00 0	0.149 4	—	✓	✓
8	PALIE R	418+190.5 28	419+730.1 77	1324.6 48	+0.0000 ‰	—	—	✓	✓	—
8	RVS	419+630.1 77	419+768.7 21	138.54 4	—	30 00 0	0.124 5	—	✓	✓
9	PENT E	419+768.7 20	427+329.7 36	7561.0 16	- 4.6000‰	—	—	✓	✓	—

Légende : ✓ Normal | △ Exceptionnel (toléré si justifié) | ✗ Non admissible

VII.8 Contraintes Spécifiques le long du Tracé

Les principales contraintes rencontrées sur le tronçon PK 410+500 – PK 427+329, identifiées d'après le plan topographique, sont :

Tableau VII.5 : Synthèse des contraintes spécifiques rencontrées le long du tracé et mesures d'adaptation adoptées

Type de contrainte	PK approximatif	Impact sur le profil	Mesure adoptée
Oueds (cours d'eau temporaires)	Plusieurs PK	Calage altimétrique imposé	Rehaussement du projet au-dessus du niveau de crue
Conduites de gaz (GAZ)	Tout le tronçon	Cote minimum imposée	Profondeur de pose $\geq 2,0$ m sous le fil d'eau
Réseaux EAU / FO	Tout le tronçon	Cote minimum imposée	Protection mécanique et croisement perpendiculaire
Zone d'ensablement	Plusieurs PK	Profil plutôt en remblai	Hauteur remblai $\geq 0,80$ m pour protection anti-ensablement

VII.9 Résumé et Vérification Globale

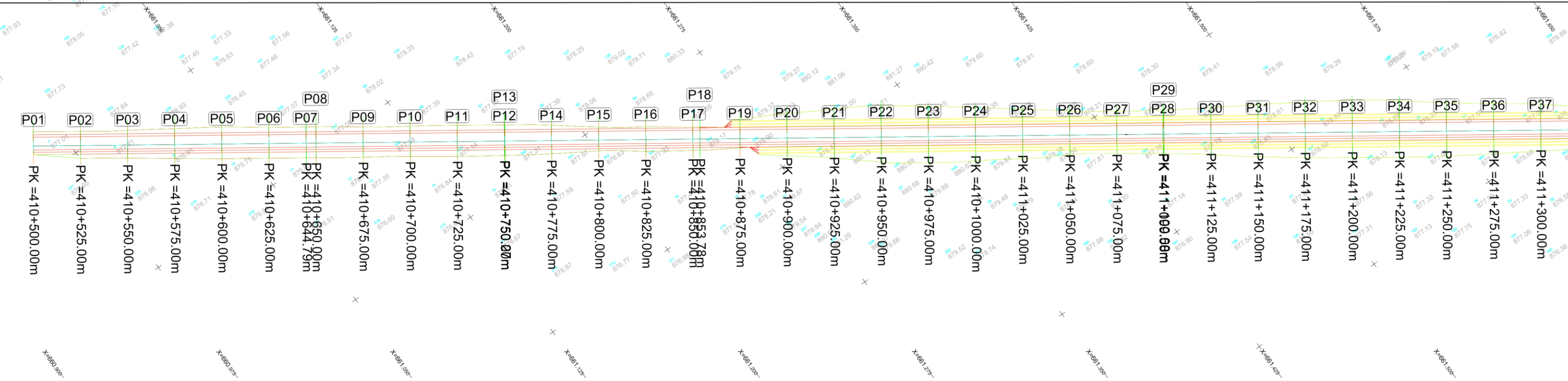
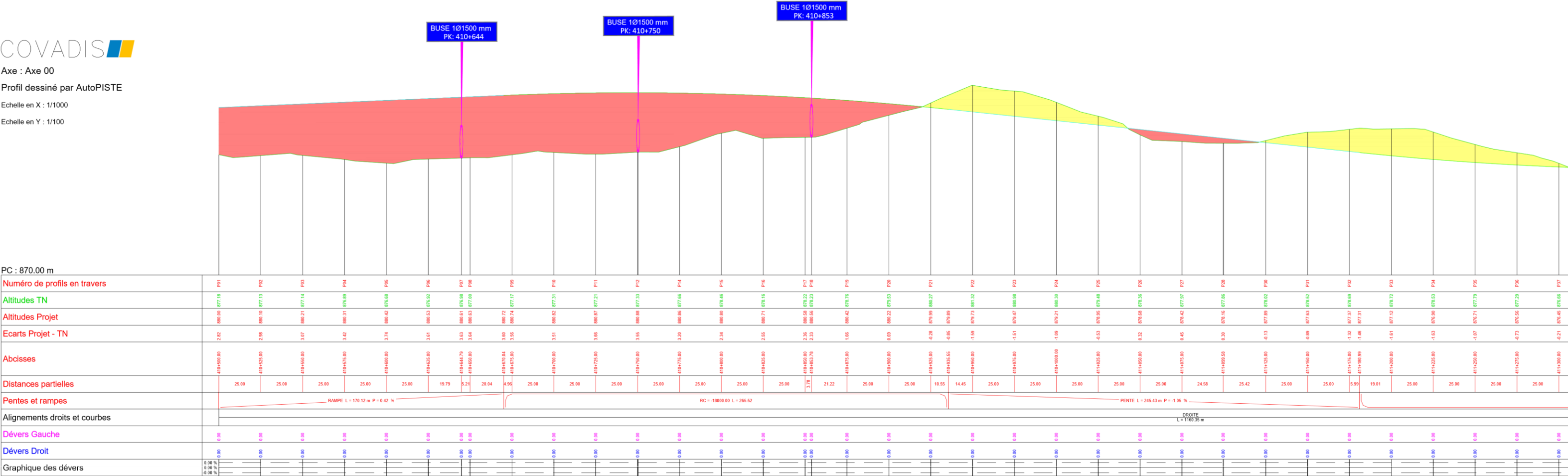
★ RÉSUMÉ DU PROFIL EN LONG – PK 410+500 → PK 427+329	
Longueur totale du tronçon	: 16 829,736 m ($\approx 16,8$ km)
Cote de départ (PK 410+500)	: 879,995 m NGF
Cote d'arrivée (PK 427+329)	: 881,588 m NGF
Cote maximale	: 916,826 m NGF (PK 418+305 – 419+630)
Cote minimale	: 876,900 m NGF (PK 411+515)
Nombre de pentes/rampes	: 9 (dont 1 palier quasi-horizontal)
Nombre de raccordements (RC)	: 8 (5 RVS + 3 RVC)
Déclivité maximale	: 10,5 ‰ ≤ 16 ‰ ✓

Rayon Rv minimal	: $ R_v = 18\,000\text{ m} \geq R_{v_min} = 16\,940\text{ m}$ ✓
Accélération verticale max	: $a_{v_max} = 0,2075\text{ m/s}^2 \leq 0,22\text{ m/s}^2$ ✓
Longueurs déclivités	: toutes $\geq 110\text{ m}$ ✓ – toutes LH $\geq 30\text{ m}$ ✓
→ Profil en long CONFORME aux exigences SNTF §6.1.5 pour Vp = 220 km/h	

VII.10 Conclusion

Le profil en long du tronçon Aïn Salah PK 410+500 – PK 427+329 a été établi conformément au **Référentiel Technique SNTF Chapitre 6 §6.1.5** pour une vitesse de projet de **Vp = 220 km/h**. Les principaux résultats obtenus sont :

- La déclivité maximale est de 10,5 ‰, inférieure à la limite de 16 ‰ — le tronçon est favorable à la grande vitesse
- Les 8 raccordements verticaux ont tous des rayons $R_v \geq 16\,940\text{ m}$ (R_{v_min} normale) — les accélérations verticales sont bien maîtrisées ($a_{v_max} = 0,2075\text{ m/s}^2 \leq 0,22\text{ m/s}^2$)
- Toutes les longueurs de raccordements LH $\geq 30\text{ m}$ — aucune anomalie sur ce critère dans le nouveau profil
- Le profil présente un plateau quasi-horizontal (0,00 ‰) de 1 325 m entre PK 418+190 et PK 419+730, ce qui est adapté à une éventuelle zone d'arrêt ou à la coordination avec des ouvrages d'art
- Le profil est globalement en remblai, adapté aux conditions d'ensablement saharien caractéristiques de la région d'Aïn Salah
- La coordination tracé en plan / profil en long est assurée : aucune interférence clothoïde / raccordement vertical n'a été identifiée



CHAPITRES VIII : ETUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

CHAPITRES VIII : ETUDE hydrologique et hydraulique

VIII.1 Introduction

Le présent chapitre a pour objet l'étude hydrologique et hydraulique du tronçon ferroviaire de la Section 04, s'étendant du PK 410+500 au PK 427+239, dans le cadre du projet d'Avant-Projet Détaillé (APD) de la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique Aïn Sâlah – Tamanrasset.

L'objectif principal de cette étude est de fournir les éléments hydrologiques nécessaires au dimensionnement des ouvrages hydrauliques transversaux et longitudinaux, afin d'assurer :

- La protection de la plateforme ferroviaire contre les crues et inondations ;
- L'évacuation optimale des eaux pluviales provenant des bassins versants interceptés par le tracé ;
- La pérennité et la stabilité de l'infrastructure ferroviaire ;
- Le respect de la continuité hydraulique des écoulements naturels.

Le tracé traverse un milieu aride caractéristique du Sahara central algérien, avec des précipitations rares mais potentiellement violentes, génératrices de crues à débit maximal important en un temps réduit. Cette particularité impose une approche méthodologique rigoureuse et prudente.

VIII.2 Objectifs de l'assainissement et du drainage

La conception du système d'assainissement et de drainage de la ligne ferroviaire répond aux objectifs suivants :

- Évacuer les eaux de ruissellement pluviales afin d'éviter tout risque de stagnation sur ou à proximité de la plateforme ;
- Protéger les terrassements (remblais et déblais) contre l'érosion hydrique ;
- Assurer la portance de la plateforme en empêchant l'infiltration d'eau dans le corps de remblai ;
- Réduire les coûts d'entretien à long terme de la voie ;
- Respecter les recommandations techniques de la SNTF et les normes UIC applicables.

VIII.3 Présentation de la zone d'étude

VIII.3.1 Situation géographique

Le tronçon étudié est localisé dans la wilaya de Tamanrasset, en plein Sahara central algérien. Il s'inscrit dans la continuation de la ligne Ain salah – Tamanrasset et s'étend du PK 410+500 jusqu'au PK 427+329, soit un linéaire de 16.80 km. Le tracé évolue dans un milieu montagneux et rocheux caractéristique du Hoggar, avec la présence de bassins versants présentant des pentes et des superficies très variables.

VIII.3.2 Caractéristiques climatiques

VIII.3.2.1 Températures

La zone se situe dans une région à climat désertique chaud (classification BWh de Köppen). Le gradient de température entre le mois le plus froid et le mois le plus chaud est très marqué, avec des températures moyennes pouvant dépasser 40°C en été et descendre en dessous de 0°C en hiver.

VIII.3.2.2 Vents

Les vents sont relativement forts sur le secteur, avec des vitesses pouvant atteindre 4,7 m/s au mois d'avril. Ce facteur est particulièrement important car il contribue au phénomène d'ensablement, imposant des dispositions constructives spécifiques pour les ouvrages hydrauliques.

VIII.3.2.3 Pluviométrie

La pluviométrie de la région est caractérisée par de rares précipitations, mais pouvant être d'une intensité extrême lors d'événements orageux. Les pluies maximales journalières retenues pour l'étude, issues des données de la station la plus représentative, sont les suivantes :

Tableau VIII.1 – Précipitations maximales journalières

Paramètre	T=10 ans	T=50 ans	T=100 ans
Pluie journalière max Pjmax (mm)	35.9	67.5	84.3
Pluie annuelle Pan (mm)	—	—	84.3
Exposant climatique b	—	—	0.14

L'exposant climatique $b = 0,14$ est utilisé pour le calcul de l'intensité de pluie pour une durée égale au temps de concentration (formule de Montana).

VIII.4. Caractéristiques morphologiques des bassins versants

VIII.4.1 Définition et délimitation

Un bassin versant est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau et ses affluents en amont d'une section de mesure donnée. La limite entre deux bassins versants est la ligne de partage des eaux (crête topographique).

La délimitation des bassins versants a été réalisée à partir des cartes topographiques au 1/50 000, en utilisant le logiciel AutoCAD, en suivant les lignes de partage des eaux selon l'orientation générale du relief. Le tracé ferroviaire constitue la limite aval de chaque bassin versant.

Pour chaque bassin versant, les paramètres morphologiques suivants ont été déterminés :

- S (km²) : superficie du bassin versant ;
- P (km) : périmètre du bassin versant ;
- $H_{\max}$ (m) / $H_{\min}$ (m) / H_{moy} (m) : altitudes maximale, minimale et moyenne ;
- L (km) : longueur du talweg principal ;
- Pente (m/m) : pente du talweg = $(H_{\max} - H_{\min}) / L$;
- K_c (indice de Gravelius) : forme du bassin versant = $0,28 \times P / \sqrt{S}$;
- T_c (h) : temps de concentration, calculé selon la formule adaptée à la superficie.

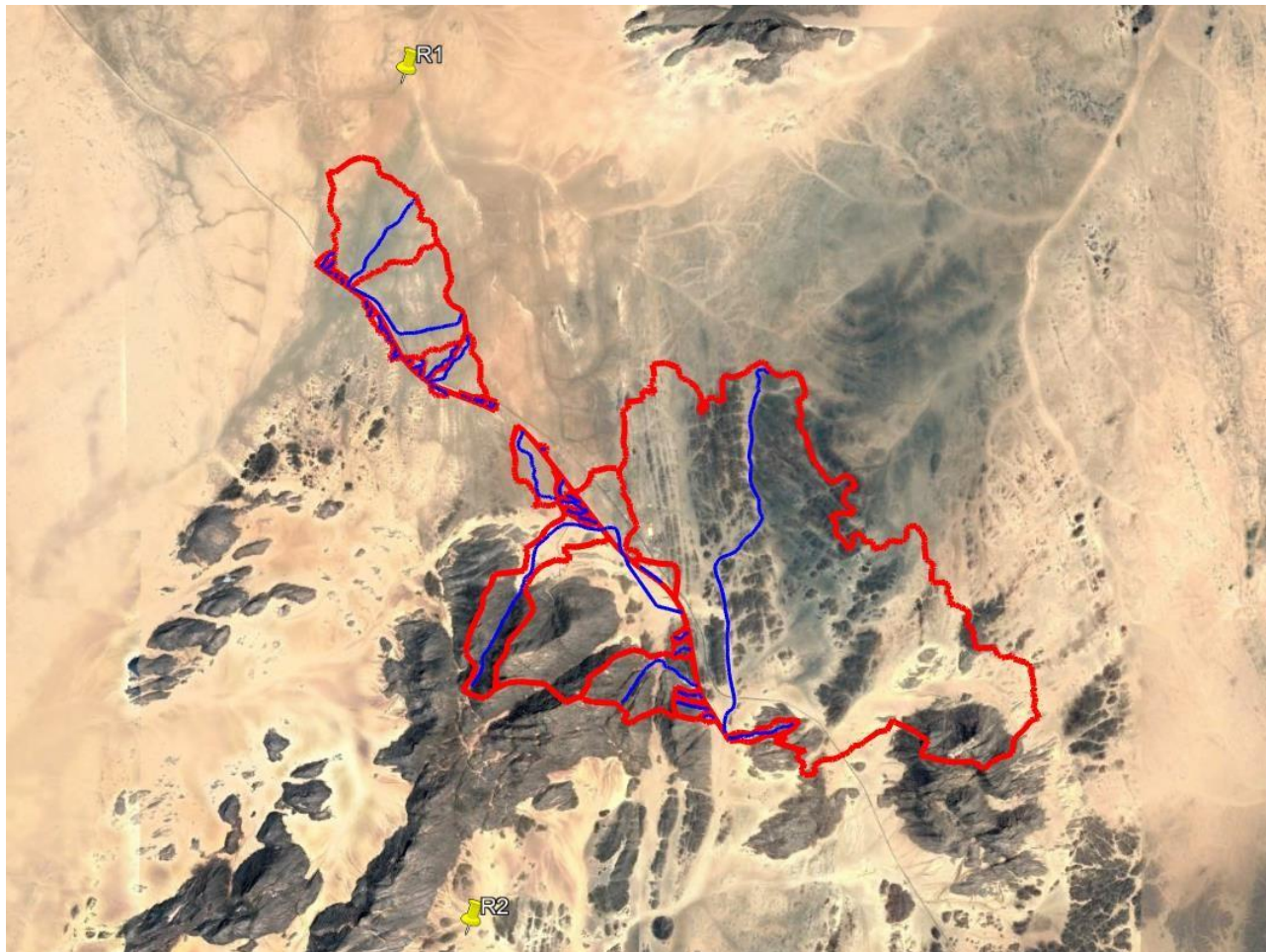


Figure VIII-1 délimitation des bassins versants.

VIII.4.2 Tableau récapitulatif des bassins versants (BV)

Le tronçon PK 410+500 – PK 427+329 intercepte 55 bassins versants (BV01 à BV55). Leurs principales caractéristiques morphologiques sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (valeurs représentatives) :

Tableau VIII.2 – Caractéristiques morphologiques des bassins versants (extrait représentatif)

N° BV	PK	S (km ²)	P (km)	Hmax (m)	Hmin (m)	Hmoy (m)	L (km)	Pente (%)	Kc	Tc (h)	Formule Tc
BV01	410+644	0.102	1.443	889.0	874.3	881.7	0.546	2.69	1.265	0.247	Ventura
BV02	410+750	0.047	0.975	886.9	876.4	881.7	0.388	2.70	1.256	0.168	Ventura
BV03	410+853	0.022	0.613	883.2	879.7	881.5	0.136	2.57	1.164	0.150	Ventura
BV04	411+100	0.026	0.673	881.2	878.0	879.6	0.151	2.15	1.164	0.150	Ventura
BV05	411+347	0.039	0.806	883.0	876.8	879.9	0.168	3.67	1.150	0.150	Ventura
BV06	411+497	5.712	10.895	897.6	871.1	884.3	2.948	0.90	1.276	2.917	Passini
BV07	411+571	5.165	10.517	905.0	870.0	887.5	3.562	0.98	1.296	2.877	Passini
BV08	412+067	0.021	0.654	881.0	877.0	879.0	0.202	1.96	1.275	0.150	Ventura
BV09	412+306	0.038	0.903	886.1	880.1	883.1	0.263	2.28	1.299	0.164	Ventura
BV10	412+557	0.075	1.251	889.0	881.0	885.0	0.403	1.98	1.276	0.248	Ventura
BV11	412+914	0.024	0.703	897.9	885.4	891.6	0.201	6.22	1.275	0.150	Ventura
BV12	412+988	0.003	0.213	892.4	887.5	890.0	0.054	8.91	1.189	0.150	Ventura

BV1 3	413+06 7	0.007	0.319	893.0	890.1	891.6	0.085	3.42	1.09 2	0.150	Ventura
BV1 4	413+13 0	0.003	0.247	891.6	890.0	890.8	0.049	3.19	1.20 3	0.150	Ventura
BV1 5	413+19 6	0.017	0.518	894.1	890.0	892.1	0.139	2.95	1.12 9	0.150	Ventura
BV1 6	413+33 4	0.008	0.359	897.1	893.2	895.1	0.081	4.87	1.14 7	0.150	Ventura
BV1 7	413+46 4	0.006	0.300	893.4	891.6	892.5	0.057	3.25	1.12 7	0.150	Ventura
BV1 8	413+55 0	0.029	0.743	898.7	890.3	894.5	0.205	4.10	1.22 5	0.150	Ventura
BV1 9	413+71 2	0.027	0.803	900.3	892.0	896.1	0.274	3.03	1.35 8	0.150	Ventura
BV2 0	413+85 0	0.007	0.391	893.7	893.0	893.3	0.038	1.67	1.29 7	0.150	Ventura
BV2 1	414+00	0.022	0.619	893.3	889.3	891.3	0.134	2.98	1.16 3	0.150	Ventura
BV2 2	414+18 6	0.087	1.184	898.8	888.9	893.8	0.444	2.23	1.12 7	0.250	Ventura
BV2 3	414+45 5	0.036	0.845	895.6	890.6	893.1	0.211	2.41	1.25 3	0.155	Ventura
BV2 4	414+60 2	0.452	3.250	901.5	886.3	893.9	1.343	1.13	1.35 3	0.803	Ventura
BV2 5	414+71 5	1.302	5.749	905.1	885.5	895.3	1.784	1.10	1.41 1	1.385	Ventura
BV2 6	414+84 2	0.009	0.407	890.0	888.8	889.4	0.114	1.03	1.20 6	0.150	Ventura
BV2 7	414+93 0	0.070	1.203	898.1	890.0	894.1	0.407	1.98	1.27 2	0.239	Ventura

BV2 8	415+67 3	0.010	0.437	898.4	896.0	897.2	0.067	3.51	1.20 4	0.150	Ventura
BV2 9	415+75 5	0.010	0.415	898.0	897.4	897.7	0.068	0.88	1.18 2	0.150	Ventura
BV3 0	415+83 0	0.008	0.366	901.8	900.0	900.9	0.067	2.62	1.14 6	0.150	Ventura
BV3 1	415+96 2	0.014	0.580	902.5	901.3	901.9	0.129	0.90	1.38 5	0.157	Ventura
BV3 2	416+02 5	0.010	0.466	904.6	900.5	902.5	0.134	3.09	1.28 3	0.150	Ventura
BV3 3	416+05 6	0.013	0.546	903.4	900.5	902.0	0.170	1.71	1.33 3	0.150	Ventura
BV3 4	416+16 4	0.014	0.572	904.2	902.0	903.1	0.151	1.45	1.34 4	0.150	Ventura
BV3 5	416+35 5	0.032	0.695	905.9	899.1	902.5	0.166	4.12	1.08 9	0.150	Ventura
BV3 6	416+45 7	0.028	0.710	909.0	903.7	906.4	0.198	2.67	1.18 0	0.150	Ventura
BV3 7	417+45 0	1.369	5.700	923.0	906.5	914.8	2.403	0.68	1.36 4	1.796	Ventura
BV3 8	418+10 0	0.029	0.723	917.0	915.3	916.2	0.137	1.21	1.19 6	0.196	Ventura
BV3 9	419+07 0	0.161	2.226	923.0	914.0	918.5	0.457	1.96	1.55 2	0.364	Ventura
BV4 0	419+77 9	0.067	1.281	920.4	911.3	915.9	0.424	2.15	1.38 5	0.224	Ventura
BV4 1	420+03 9	0.123	1.736	920.2	912.0	916.1	0.766	1.07	1.38 8	0.430	Ventura
BV4 2	420+09 0	0.090	1.636	918.6	909.7	914.1	0.585	1.52	1.52 7	0.309	Ventura

BV4 3	420+46 7	0.078	1.380	917.2	908.0	912.6	0.502	1.83	1.38 2	0.262	Ventura
BV4 4	420+67 5	4.407	14.27 4	1314. 1	902.1	1108. 1	4.863	8.47	1.90 4	0.916	Ventura
BV4 5	421+40 0	6.626	18.96 5	1314. 1	901.6	1107. 9	6.746	6.12	2.06 3	1.550	Passini
BV4 6	422+69 7	0.480	3.441	904.9	892.1	898.5	0.697	1.83	1.39 0	0.651	Ventura
BV4 7	423+67 5	17.72 8	20.68 2	1717. 0	884.0	1300. 5	9.099	9.15	1.37 5	1.943	Passini
BV4 8	424+14 2	0.097	1.341	911.6	895.0	903.3	0.458	3.63	1.20 5	0.208	Ventura
BV4 9	424+60 0	0.183	1.817	913.5	889.4	901.5	0.526	4.58	1.18 8	0.254	Ventura
BV5 0	425+54 4	0.158	2.122	1108. 6	888.0	998.3	2.671	8.26	1.49 3	0.176	Ventura
BV5 1	425+88 2	3.120	8.412	958.3	884.7	921.5	0.701	10.4 9	1.33 3	0.693	Ventura
BV5 2	426+24 2	0.311	2.477	1022. 0	880.0	951.0	0.877	16.1 9	1.24 3	0.176	Ventura
BV5 3	426+47 5	0.063	1.033	912.3	874.2	893.2	0.334	11.41	1.14 9	0.150	Ventura
BV5 4	426+95 7	80.71 9	56.01 7	929.0	868.5	898.8	10.49 3	0.58	1.74 6	11.74 6	Giandott i
BV5 5	427+09 5	0.432	4.099	926.4	875.2	900.8	1.778	2.88	1.74 7	0.492	Ventura

Note : La liste complète des 55 bassins versants figure en annexe du présent rapport. Les bassins à grande superficie (BV44, BV45, BV47, BV51, BV54) ont un impact hydraulique majeur et ont nécessité un dimensionnement spécifique des ouvrages.

VIII.5. Étude hydrologique – Calcul des débits de crue

VIII.5.1 Temps de concentration

Le temps de concentration T_c représente le temps nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombant au point le plus hydrauliquement éloigné du bassin versant atteigne l'exutoire. Ce paramètre conditionne directement l'intensité de pluie retenue pour le calcul du débit.

Le choix de la formule de calcul est fonction de la superficie du bassin versant :

VIII.5.1.1 Formule de Ventura ($S < 5 \text{ km}^2$)

$$T_c = 0.127 \times \sqrt[3]{(S / i)}$$

Où : T_c = temps de concentration (heures) ; S = superficie (km^2) ; i = pente du talweg (m/m).

VIII.5.1.2 Formule de Passini ($5 \text{ km}^2 \leq S \leq 25 \text{ km}^2$)

$$T_c = 0.108 \times \sqrt[3]{(S \times L^2 / i)}$$

Où : L = longueur du talweg principal (km).

VIII.5.1.3 Formule de Giandotti ($S > 25 \text{ km}^2$)

$$T_c = (4\sqrt[3]{S} + 1.5L) / (0.8 \times \sqrt[3]{(H_{\text{moy}} - H_{\text{min}})})$$

Cette formule est appliquée aux très grands bassins versants tels que BV54 ($S = 80,72 \text{ km}^2$).

La valeur minimale de T_c retenue est de 0,15 heure (9 minutes), conformément aux prescriptions techniques en vigueur pour les petits bassins versants en zone aride.

VIII.5.2 Intensité de pluie

L'intensité de pluie pour une période de retour donnée et une durée égale au temps de concentration est calculée à l'aide de la formule de Montana modifiée :

$$P(t, T) = 1.13 \times P_{j\text{max}}(T) \times (t / 24)^b$$

$$I(t, T) = P(t, T) / T_c \text{ [mm/h]}$$

Avec : $P_{j\text{max}}(T)$ = précipitation journalière maximale pour la période de retour T (mm) ; b = exposant climatique = 0,14 ; t = temps de concentration en heures.

VIII.5.3 Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement C_r est estimé par la méthode de Kenessey, basée sur la sommation de trois coefficients partiels :

$$C_r = C_1 + C_2 + C_3$$

Les valeurs adoptées pour la région sont :

Tableau VIII.3 – Coefficients de ruissellement selon la méthode de Kenessey

Coefficient	Critère	Valeur adoptée	Source
C1 (pente)	Pente < 3.5 %	0.05	Kenessey
C2 (sol)	Peu perméable	0.15	Kenessey
C3 (végétation)	Labours/champs	0.11	Kenessey
Cr TOTAL	—	0.31 à 0.66	Selon BV

Remarque : La valeur de Cr varie entre 0,31 et 0,66 selon les caractéristiques de chaque bassin versant (pente, perméabilité, couverture végétale). Pour les bassins à sol plus imperméable (BV52, BV53, BV54), Cr = 0,46 à 0,66.

VIII.5.4 Méthodes de calcul des débits de crue

VIII.5.4.1 Méthode Rationnelle ($S \leq 10 \text{ km}^2$)

La méthode rationnelle est appliquée à tous les bassins versants de superficie inférieure à 10 km^2 . L'expression du débit de pointe est la suivante :

$$Q(T) = C \times I(T_c, T) \times S / 3.6 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Où : C = coefficient de ruissellement ; I = intensité de pluie en (mm/h) ; S = superficie (km^2).

VIII.5.4.2 Méthode de Mallet-Gauthier ($S > 10 \text{ km}^2$)

Pour les bassins versants de superficie supérieure à 10 km^2 , la méthode de Mallet-Gauthier est utilisée comme méthode de vérification et de recoupement. Elle est basée sur une formule empirique tenant compte de la superficie et des caractéristiques pluviométriques de la région ($K = 2$, $A = 25$).

VIII.5.4.3 Méthode de Giandotti (grands bassins versants)

Appliquée au BV54 ($S = 80,72 \text{ km}^2$), dont le temps de concentration est calculé par la formule de Giandotti. Le débit retenu est celui de la méthode donnant la valeur la plus conservative.

VIII.5.5 Résultats des débits de crue centennaux (Q_{100})

Les débits de pointe pour une période de retour de 100 ans (Q_{100}) ont été calculés pour l'ensemble des 55 bassins versants. Le tableau ci-dessous présente les résultats des bassins les plus significatifs et les ouvrages hydrauliques préconisés :

Tableau VIII.4 – Débits de crue Q100 et ouvrages retenus (bassins versants représentatifs)

N° BV	PK	S (km ²)	Cr	Q100 (m ³ /s)	Méthode	Ouvrage retenu
BV01	410+644	0.102	0.591	3.010	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV02	410+750	0.047	0.591	1.942	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV03	410+853	0.022	0.591	0.987	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV04	411+100	0.026	0.591	1.188	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV05	411+347	0.039	0.613	1.809	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV06	411+497	5.712	0.591	20.188	Rationnelle	DALOT (4×2)
BV07	411+571	5.165	0.591	18.474	Rationnelle	DALOT (4×2)
BV08	412+067	0.021	0.591	0.936	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV09	412+306	0.038	0.591	1.594	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV10	412+557	0.075	0.591	2.223	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV11	412+914	0.024	0.613	1.120	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV12	412+988	0.003	0.613	0.118	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV13	413+067	0.007	0.591	0.303	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV14	413+130	0.003	0.591	0.150	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV15	413+196	0.017	0.591	0.749	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV16	413+334	0.008	0.613	0.360	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV17	413+464	0.006	0.591	0.252	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV18	413+550	0.029	0.613	1.355	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV19	413+712	0.027	0.591	1.243	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV20	413+850	0.007	0.591	0.323	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500

BV21	414+00	0.022	0.591	1.007	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV22	414+186	0.087	0.591	2.526	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV23	414+455	0.036	0.591	1.575	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV24	414+602	0.452	0.591	4.846	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV25	414+715	1.302	0.591	8.734	Rationnelle	DALOT (2.5×2)
BV26	414+842	0.009	0.591	0.406	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV27	414+930	0.070	0.591	2.130	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV28	415+673	0.010	0.613	0.485	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV29	415+755	0.010	0.591	0.439	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV30	415+830	0.008	0.591	0.364	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV31	415+962	0.014	0.591	0.599	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV32	416+025	0.010	0.591	0.469	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV33	416+056	0.013	0.591	0.597	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV34	416+164	0.014	0.591	0.645	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV35	416+355	0.032	0.613	1.500	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV36	416+457	0.028	0.591	1.287	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV37	417+450	1.369	0.591	7.342	Rationnelle	DALOT (2×2)
BV38	418+100	0.029	0.591	1.034	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV39	419+070	0.161	0.591	3.410	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV40	419+779	0.067	0.591	2.153	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV41	420+039	0.123	0.591	2.251	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV42	420+090	0.090	0.591	2.194	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV43	420+467	0.078	0.591	2.193	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500

BV44	420+675	4.407	0.613	43.693	Rationnelle	DALOT (4×3)×2
BV45	421+400	6.626	0.613	41.789	Rationnelle	DALOT (4×3)×2
BV46	422+697	0.480	0.591	6.163	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV47	423+675	17.728	0.613	32.228	Mallet-Gauthier	DALOT (3×2)×3
BV48	424+142	0.097	0.613	3.447	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV49	424+600	0.183	0.613	5.477	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV50	425+544	0.158	0.613	6.489	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV51	425+882	3.120	0.613	39.331	Rationnelle	DALOT (4×3)×2
BV52	426+242	0.311	0.655	13.624	Rationnelle	DALOT (3×2)
BV53	426+475	0.063	0.655	3.187	Rationnelle	BUSE 1×Ø1500
BV54	426+957	80.719	0.591	130.716	Giandotti	viaduc
BV55	427+095	0.432	0.591	7.055	Rationnelle	DALOT (2×2)

Note : Pour les bassins versants avec $Q_{100} > 10 \text{ m}^3/\text{s}$, plusieurs cellules de dalots sont prévues. Le débit maximal constaté est $Q_{100} = 130,72 \text{ m}^3/\text{s}$ pour BV54 (PK 426+957), qui nécessite un viaduc

VIII.6 Étude hydraulique – Dimensionnement des ouvrages

VIII.6.1 Ouvrages transversaux

VIII.6.1.1 Principes de dimensionnement

Les ouvrages hydrauliques transversaux sont dimensionnés pour transiter le débit de projet Q_{100} sous les conditions suivantes :

- Le débit de saturation (Q_{ps}) de l'ouvrage doit être supérieur au débit de crue centennal : $Q_{ps} > Q_{100}$;
- La vitesse d'écoulement dans l'ouvrage doit rester inférieure à 4 m/s pour éviter l'érosion ;
- Les conditions d'auto-curage doivent être vérifiées afin d'éviter les dépôts : $V > 0,6 \text{ m/s}$ pour $Q = 0,1 \times Q_{ps}$ et $V > 0,3 \text{ m/s}$ pour $Q = 0,01 \times Q_{ps}$.

Le calcul du débit de saturation est effectué à l'aide de la formule de Manning-Strickler :

$$Q_{ps} = K_s \times S_m \times R_h^{(2/3)} \times I^{(1/2)}$$

Avec : K_s = coefficient de rugosité de Strickler = 70 (béton lisse) ; S_m = section mouillée (m^2) ;
 R_h = rayon hydraulique (m) ; I = pente longitudinale (m/m).

VIII.6.1.2 Buses circulaires

Les buses de section circulaire sont retenues pour les bassins versants présentant un débit Q_{100} modéré (en général $Q_{100} < 7 \text{ m}^3/\text{s}$). Les diamètres normalisés retenus sont : $\varnothing = 1000 \text{ mm}$, 1200 mm et 1500 mm . La hauteur de remplissage maximale est limitée à $H_r = 0,80 \times D$.

Les résultats de vérification hydraulique des buses sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau VIII.5 – Vérification hydraulique des buses

PK	Ouvrage	Q_{100} (m^3/s)	$\varnothing$ (m)	Q_{ps} (m^3/s)	V_{ps} (m/s)	R_q	R_v	V (m/s)	Vérif.
410+644	1× $\varnothing 1500$	3.010	1.5	6.433	3.640	0.468	0.972	1.165	Vérifiée
410+750	1× $\varnothing 1500$	1.942	1.2	6.433	3.137	0.547	1.015	1.004	Vérifiée
410+853	1× $\varnothing 1500$	0.987	1.0	6.433	2.778	0.452	0.963	0.889	Vérifiée
411+100	1× $\varnothing 1500$	1.188	1.0	6.433	2.778	0.545	1.014	0.889	Vérifiée
411+347	1× $\varnothing 1500$	1.809	1.2	6.433	3.137	0.510	0.996	1.004	Vérifiée
412+067	1× $\varnothing 1500$	0.936	1.0	6.433	2.778	0.429	0.947	0.889	Vérifiée
412+306	1× $\varnothing 1500$	1.594	1.2	6.433	3.137	0.449	0.961	1.004	Vérifiée
412+557	1× $\varnothing 1500$	2.223	1.5	6.433	3.640	0.346	0.879	1.165	Vérifiée
412+914	1× $\varnothing 1500$	1.120	1.0	6.433	2.778	0.513	0.998	0.889	Vérifiée
412+988	1× $\varnothing 1500$	0.118	1.0	6.433	2.778	0.054	0.363	0.889	Vérifiée
413+067	1× $\varnothing 1500$	0.303	1.0	6.433	2.778	0.139	0.590	0.889	Vérifiée
413+130	1× $\varnothing 1500$	0.150	1.0	6.433	2.778	0.069	0.412	0.889	Vérifiée
413+196	1× $\varnothing 1500$	0.749	1.0	6.433	2.778	0.343	0.877	0.889	Vérifiée
413+334	1× $\varnothing 1500$	0.360	1.0	6.433	2.778	0.165	0.641	0.889	Vérifiée
413+464	1× $\varnothing 1500$	0.252	1.0	6.433	2.778	0.115	0.538	0.889	Vérifiée

413+550	1×Ø1500	1.355	1.0	6.433	2.778	0.621	1.046	0.889	Vérifiée
413+712	1×Ø1500	1.243	1.0	6.433	2.778	0.570	1.025	0.889	Vérifiée
413+850	1×Ø1500	0.323	1.0	6.433	2.778	0.148	0.608	0.889	Vérifiée
414+00	1×Ø1500	1.007	1.0	6.433	2.778	0.462	0.969	0.889	Vérifiée
414+186	1×Ø1500	2.526	1.5	6.433	3.640	0.393	0.920	1.165	Vérifiée
414+455	1×Ø1500	1.575	1.2	6.433	3.137	0.444	0.957	1.004	Vérifiée
414+602	1×Ø1500	4.846	1.2	6.433	3.137	1.366	1.250	1.004	Vérifiée
414+842	1×Ø1500	0.406	1.0	6.433	2.778	0.186	0.677	0.889	Vérifiée
414+930	1×Ø1500	2.130	1.5	6.433	3.640	0.331	0.870	1.165	Vérifiée
415+673	1×Ø1500	0.485	1.0	6.433	2.778	0.222	0.734	0.889	Vérifiée
415+755	1×Ø1500	0.439	1.0	6.433	2.778	0.201	0.702	0.889	Vérifiée
415+830	1×Ø1500	0.364	1.0	6.433	2.778	0.167	0.644	0.889	Vérifiée
415+962	1×Ø1500	0.599	1.0	6.433	2.778	0.275	0.804	0.889	Vérifiée
416+025	1×Ø1500	0.469	1.0	6.433	2.778	0.215	0.723	0.889	Vérifiée
416+056	1×Ø1500	0.597	1.0	6.433	2.778	0.274	0.803	0.889	Vérifiée
416+164	1×Ø1500	0.645	1.0	6.433	2.778	0.295	0.828	0.889	Vérifiée
416+355	1×Ø1500	1.500	1.2	6.433	3.137	0.423	0.943	1.004	Vérifiée
416+457	1×Ø1500	1.287	1.0	6.433	2.778	0.590	1.034	0.889	Vérifiée
418+100	1×Ø1500	1.034	1.0	6.433	2.778	0.474	0.976	0.889	Vérifiée
419+070	1×Ø1500	3.410	1.5	6.433	3.640	0.530	1.007	1.165	Vérifiée
419+779	1×Ø1500	2.153	1.5	6.433	3.640	0.335	0.875	1.165	Vérifiée
420+039	1×Ø1500	2.251	1.5	6.433	3.640	0.350	0.883	1.165	Vérifiée
420+090	1×Ø1500	2.194	1.5	6.433	3.640	0.341	0.875	1.165	Vérifiée
420+467	1×Ø1500	2.193	1.5	6.433	3.640	0.341	0.875	1.165	Vérifiée

422+697	1×Ø1500	6.163	1.5	6.433	3.640	0.958	1.128	1.165	Vérifiée
424+142	1×Ø1500	3.447	1.5	6.433	3.640	0.536	1.009	1.165	Vérifiée
424+600	1×Ø1500	5.477	1.2	6.433	3.137	1.544	1.353	1.004	Vérifiée
425+544	1×Ø1500	6.489	1.5	6.433	3.640	1.009	1.139	1.165	Vérifiée
426+475	1×Ø1500	3.187	1.5	6.433	3.640	0.495	0.988	1.165	Vérifiée

VIII.6.1.3 Dalots rectangulaires

Pour les bassins versants à fort débit ($Q_{100} > 7 \text{ m}^3/\text{s}$), des dalots de section rectangulaire ($B \times H$) sont adoptés. La section de passage est déterminée de manière à ce que le débit de saturation Q_{ps} soit supérieur au débit de projet, avec une hauteur de remplissage $H_r = 0,80 \times H$.

En raison des conditions d'ensablement intense caractéristiques de la zone (vents chargés en sable), il a été décidé de remplacer les buses par des dalots partout où le risque de colmatage est élevé. Cette décision est justifiée par la nécessité de faciliter l'accès pour l'entretien et le curage.

Les vérifications hydrauliques des dalots sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau VIII.6 – Vérification hydraulique des dalots

PK	Ouvrage	Q100 (m ³ /s)	B (m)	H (m)	Sm (m ²)	Pm (m)	Qps (m ³ /s)	V (m/s)	Vérif.
411+497	DALOT 4×2	20.19	4	2	6.0	7.0	37.90	3.37	Vérifiée
411+571	DALOT 4×2	18.47	4	2	6.0	7.0	37.90	3.08	Vérifiée
414+715	DALOT 2.5×2	8.73	2.5	2	3.75	5.5	20.33	2.33	Vérifiée
417+450	DALOT 2×2	7.34	2	2	3.0	5.0	14.94	2.45	Vérifiée
420+675	DALOT (4×3)×2	43.69	4	3	9.0×2	8.5×2	65.45×2	2.43	Vérifiée
421+400	DALOT (4×3)×2	41.79	4	3	9.0×2	8.5×2	65.45×2	2.32	Vérifiée

PK	Ouvrage	Q100 (m ³ /s)	B (m)	H (m)	Sm (m ²)	Pm (m)	Qps (m ³ /s)	V (m/s)	Vérif.
423+675	DALOT (3×2)×3	32.23	3	2	4.5×3	6.0×3	26.00×3	3.36	Vérifiée
425+882	DALOT (4×3)×2	39.33	4	3	9.0×2	8.5×2	65.45×2	2.19	Vérifiée
426+242	DALOT 3×2	13.62	3	2	4.5	6.0	26.00	3.03	Vérifiée
427+095	DALOT 2×2	7.05	2	2	3.0	5.0	14.94	2.35	Vérifiée

Toutes les conditions hydrauliques sont vérifiées pour l'ensemble des ouvrages transversaux. Les vitesses d'écoulement restent dans les limites autorisées et les conditions d'auto-curage sont satisfaites.

VIII.6.2 Ouvrages longitudinaux (fossés)

VIII.6.2.1 Rôle et conception

Les fossés longitudinaux ont pour rôle de collecter et d'évacuer les eaux de ruissellement provenant de la plateforme ferroviaire, des talus et des zones latérales adjacentes, en les conduisant par gravité vers les exutoires naturels ou vers les ouvrages transversaux.

Le système de drainage longitudinal adopté est le suivant :

- En section de déblai : fossé trapézoïdal disposé en pied de talus, de part et d'autre de la plateforme ;
- En section de remblai : collecte des eaux au pied de remblai via des saignées ou fossés ;
- L'écoulement se fait toujours par gravité, sans recours à des dispositifs de pompage.

VIII.6.2.2 Débit de projet des fossés

Les fossés longitudinaux sont dimensionnés pour une période de retour de 10 ans ($T = 10$ ans). Le débit apporté est calculé en tenant compte des contributions de la plateforme, des bermes et des talus :

$$Q_a = Q_{pf} + Q_b + Q_t$$

Pour les sections où la hauteur des déblais et remblais est inférieure à 8 m, il n'y a pas de bermes ($Q_b = 0$), et le débit se réduit à :

$$Q_a = Q_{pf} + Q_t$$

VIII.6.2.3 Dimensionnement hydraulique des fossés

La formule de Manning-Strickler est appliquée pour le calcul de la capacité hydraulique des fossés :

$$Q_s = K_s \times S_m \times R_h^{(2/3)} \times I^{(1/2)}$$

Pour les fossés trapézoïdaux, les paramètres géométriques sont :

- Section mouillée : $S_m = (b + z \times h) \times h$
- Périmètre mouillé : $P_m = b + 2h \times \sqrt{1 + z^2}$
- Rayon hydraulique : $R_h = S_m / P_m$

Avec z = cotangente de l'angle des berges ($z = 1$ pour les talus à 45°).

Tableau VIII.7 – Dimensionnement du fossé trapézoïdal retenu

b (m)	h (m)	z	S_m (m²)	P_m (m)	R_h (m)	Q_s (m³/s)	Q_a < Q_s
0.5	0.5	1	0.50	1.91	0.262	2.02	✓ Vérifié

Les dimensions retenues pour les fossés longitudinaux sur l'ensemble du tronçon sont : fossé trapézoïdal en béton armé avec $b = 0,50$ m et $h = 0,50$ m (pente de berge $z = 1$), de capacité $Q_s = 2,02$ m³/s > Q_a , condition vérifiée.

VIII.7. Récapitulatif des ouvrages hydrauliques

L'étude hydrologique et hydraulique du tronçon PK 410+500 – PK 427+329 a conduit à la définition des ouvrages de drainage transversaux et longitudinaux suivants :

VIII.7.1 Ouvrages transversaux

- Buses circulaires (Ø1500 mm) : pour les bassins versants de faible débit ($Q_{100} < 7$ m³/s)
- Dalots simple cellule (B × H) : 1×(2×2), 1×(2.5×2), 1×(3×2) ;
- Dalots multicellules : 2×(4×2), 2×(4×3), 3×(3×2), 3×(4×3), pour les grands bassins versants.

Viaduc et le plus important ouvrage situé au PK 426+957 (BV54, oued principal), dimensionné pour $Q_{100} = 130,72$ m³/s

VIII.7.2 Ouvrages longitudinaux

- Fossés trapézoïdaux en béton armé : $b = 0,50$ m, $h = 0,50$ m, $z = 1$, sur toute la longueur du tronçon en section de déblai ;
- Tranchées drainantes de 0,50 m de largeur × 1,00 m de profondeur (granulats drainants + géotextile + tuyau de collecte) au pied des remblais.

VIII.8. Conclusion

L'étude hydrologique et hydraulique réalisée pour le tronçon ferroviaire PK 410+500 – PK 427+329 de la ligne Aïn Salah – Tamanrasset a permis d'identifier et de dimensionner l'ensemble des ouvrages nécessaires à la protection de la plateforme ferroviaire contre les crues.

Les principaux résultats de cette étude sont les suivants :

- 55 bassins versants ont été délimités et caractérisés sur le tronçon étudié, avec des superficies variant de 0,002 km² (BV12) à 80,72 km² (BV54) ;
- Les débits de crue centennaux (Q100) varient de 0,12 m³/s à 130,72 m³/s selon les bassins versants ;
- Trois méthodes de calcul ont été appliquées selon la taille des bassins : méthode rationnelle ($S \leq 10$ km²), méthode de Mallet-Gauthier ($S > 10$ km²) et méthode de Giandotti (grands bassins) ;
- Les ouvrages transversaux adoptés comprennent des buses (Ø 1500 mm) et des dalots (simples et des cellules) et une viaduc dont les dimensions ont été vérifiées hydrauliquement ;
- Un fossé trapézoïdal uniforme ($b = 0,50$ m, $h = 0,50$ m) a été retenu pour le drainage longitudinal sur l'ensemble du tronçon ;
- Toutes les vérifications hydrauliques (débit de saturation, vitesse maximale, conditions d'auto-curage) sont satisfaites pour l'ensemble des ouvrages dimensionnés.

Cette étude garantit la durabilité et la sécurité de la voie ferrée face aux phénomènes hydrologiques extrêmes caractéristiques du milieu saharien, tout en permettant la continuité hydraulique des écoulements naturels.

CHAPITRES IX : ETUDE GEOTECHNIQUE ET GEOLOGIQUE

CHAPITRES IX : ETUDE GEOTECHNIQUE ET GEOLOGIQUE

IX.1. Introduction

L'étude géologique et géotechnique est une étape fondamentale dans la conception et la réalisation de tout projet ferroviaire. Elle permet d'analyser les caractéristiques mécaniques et physiques des sols et des roches afin de fournir des recommandations fiables pour la conception de l'infrastructure.

Dans le cadre du projet APD de la ligne ferroviaire à voie unique Aïn Sâlah – Tamanrasset le présent chapitre traite de l'étude géologique et géotechnique du tronçon de la Section 04, s'étendant du PK 410+500 au PK 427+329 (linéaire de 16.80 km). La zone d'étude se situe dans le Hoggar central, wilaya de Tamanrasset, milieu aride et montagneux caractérisé par des formations rocheuses précambriennes, des alluvions sahariennes et des sables éoliens.

Cette étude a pour objectifs de :

- Définir la nature géologique et lithologique des formations traversées par le tracé ;
- Caractériser les propriétés physico-mécaniques des sols à partir de la campagne d'investigations ;
- Classer les sols selon les référentiels GTR et UIC 719R ;
- Identifier les zones à risques (faible portance, agressivité chimique, zones inondables) ;
- Évaluer la stabilité des talus en déblai et en remblai ;
- Proposer les gîtes d'emprunts et carrières adaptés au projet.

IX.2. Étude Géologique

IX.2.1. Aspect tectonique de la zone d'étude

Le tracé ferroviaire de la Section 04 traverse le massif du Hoggar, l'une des plus anciennes structures géologiques d'Afrique. Le socle précambrien du Hoggar est constitué de roches métamorphiques et plutoniques (granites, gneiss, quartzites) formées il y a plus de 2 milliards d'années. La tectonique de la région est caractérisée par :

- Un socle précambrien rigide et stable, peu affecté par les failles récentes ;
- Des structures anticlinales et synclinales à grand rayon de courbure, orientées globalement NNE–SSW ;
- L'absence de zones de subduction ou de compression active ; la région est classée en zone de sismicité nulle (Zone 0 selon le règlement parasismique algérien RPA 2024) ;
- Des intrusions volcaniques récentes (Néogène) sous forme de dykes et de coulées basaltiques, visibles ponctuellement dans le massif de l'Atakor.

Ces caractéristiques tectoniques confèrent à la zone une très bonne stabilité structurelle, favorable à la construction ferroviaire.

IX.2.2. Aperçu géologique local (tracé PK 410+500 – PK 427+239)

D'après la carte géologique de la région au 1/200 000, le tracé de la Section 04 traverse les formations géologiques suivantes, du Nord vers le Sud :

- PK 410+500 – PK 413+500 : Formations du Précambrien supérieur – grès et quartzites du Hoggar, compacts à très compacts. Rocher sain à sub-sain, coloré en brun-rouge. Le tracé est en déblai modéré dans cette zone (h = 1.5 à 4.0 m).

- PK 413+500 – PK 418+000 : Formations alluvionnaires quaternaires anciennes – sables grossiers à moyens avec graviers de quartzite, localement encroûtés par une dalle calcaire superficielle. Terrain relativement plat. Tracé en remblai faible à modéré.
- PK 418+000 – PK 421+500 : Dépôts éoliens quaternaires récents (ergs locaux) – sables fins à moyens, peu compacts en surface. Présence de dunes basses stabilisées. Zone sensible à l'ensablement.
- PK 421+500 – PK 424+000 : Retour aux formations alluvionnaires compactes (sables grossiers + graviers + galets) correspondant aux lits anciens des oueds du système hydrographique du Hoggar.
- PK 424+000 – PK 427+500 : Zone de convergence des bassins versants majeurs (BV47, BV51, BV54). Alluvions récentes sablo-graveleuses à argileuses dans les fonds d'oueds. Présence de matériaux fins argileux localement (argile sableuse, marne sableuse).

IX.2.3. Hydrogéologie le long du tracé

Le contexte hydrogéologique de la région du Hoggar est caractérisé par :

- Une nappe phréatique très profonde ou absente dans les zones rocheuses (PK 410+500 – PK 413+500). Aucune influence sur la construction.
- Des aquifères alluviaux discontinus dans les lits des oueds principaux (BV47, BV54). La nappe est temporaire, alimentée uniquement lors des crues. En dehors des épisodes pluvieux, le niveau piézométrique est > 5 m de profondeur.
- Un risque d'engorgement temporaire de surface lors des crues exceptionnelles (Q100 allant jusqu'à $130.7 \text{ m}^3/\text{s}$ pour BV54 au PK 426+957), sans remontée de nappe durable.

L'absence d'une nappe phréatique permanente et superficielle sur l'ensemble du tracé constitue un avantage majeur pour la stabilité de la plateforme ferroviaire. Toutefois, les zones de fond d'oued nécessitent des dispositions constructives spéciales pour la protection contre les crues (enrochements, dalots dimensionnés au Q100).

IX.3. Étude Géotechnique

IX.3.1. Contenu de la campagne d'investigation géotechnique

IX.3.1.1. Reconnaissance in situ

La campagne de reconnaissance géotechnique réalisée sur le tracé de la Section 04 (PK 410+500 – PK 427+329) comprend les essais et sondages in situ suivants :

- Six (06) sondages carottés (SC) de profondeur 10 à 20 m, avec prélèvements d'échantillons intacts et remaniés à différentes profondeurs, pour analyses en laboratoire ;
- Douze (12) puits de reconnaissance (PU) réalisés à la pelle mécanique, de 3 à 4 m de profondeur, avec prélèvement d'échantillons remaniés ;
- Huit (08) essais au pénétromètre dynamique léger (PDL) jusqu'au refus, pour estimation continue de la résistance du terrain ;
- Trois (03) essais pressiométriques (SP) dans les zones de remblais importants ($H > 8$ m), à raison d'un essai tous les 1 m.

IX.3.1.2. Reconnaissance au laboratoire

Les échantillons intacts et remaniés prélevés lors des sondages et puits de reconnaissance ont fait l'objet des analyses suivantes en laboratoire :

a) Essais physiques d'identification :

- Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie ;
- Limites d'Atterberg : WL (limite de liquidité), WP (limite de plasticité), Ip (indice de plasticité) ;
- Teneur en eau naturelle W (%) ;
- Densité apparente γ_h et densité sèche γ_d (t/m^3) ;
- Essai au bleu de méthylène VBS ;
- Indice CBR immédiat (après compactage Proctor).

b) Essais mécaniques :

- Essai Proctor modifié : détermination de la densité sèche optimale γ_{dOPM} et de la teneur en eau optimale WOPM ;
- Cisaillement à la boîte de Casagrande (UU et CD) : cohésion C et angle de frottement interne ϕ ;
- Essai œdométrique : pression de consolidation P_c , indice de compression C_c , indice de gonflement C_g .

c) Essais chimiques :

- Teneur en sulfates SO_4^{2-} (%) ;
- Teneur en chlorures Cl^- (%) ;
- Teneur en carbonates $CaCO_3$ (%) ;
- Matière organique MO (%).

II.2. Lithologie de la zone d'étude

En accord avec les résultats des sondages carottés et des puits de reconnaissance, les principales formations géologiques traversées par le tracé de la Section 04 sont récapitulées dans le tableau ci-après :

Tableau IX.1 – Lithologie de la zone d'étude

N° Sondage / Puit	Profondeur (m)	Nature lithologique
SC-01	0.00 – 2.00	Sable éolien fin beige, peu compact (croûte superficielle).
SC-01	2.00 – 10.00	Sable grossier jaunâtre compact avec graviers de quartzite et traces de gypse.
SC-01	10.00 – 15.00	Gravier sablo-graveleux compact – transition vers le substratum rocheux.
SC-02	0.00 – 1.50	Sable éolien fin à moyen, couleur beige-rougeâtre.
SC-02	1.50 – 8.00	Sable grossier compact avec intercalations graveleuses et cristaux de gypse (3.5–5.0 m).
SC-02	8.00 – 15.00	Grès altéré à semi-compact – substratum du Hoggar.
SC-03	0.00 – 3.00	Alluvions récentes : sable grossier + gravier + galets de quartzite (lit d'oued).
SC-03	3.00 – 12.00	Sable moyennement compact avec passées argileuses entre 5.0–7.0 m.
SC-03	12.00 – 20.00	Grès quartzitique compact (Hoggar – socle précambrien).
PU-01	0.00 – 3.00	Sable fin éolien jaunâtre, peu à moyennement compact.
PU-02	0.00 – 3.50	Sable grossier graveleux compact, couleur beige, traces de gypse.
PU-03	0.00 – 1.00	Encroûtement calcaire superficiel (dalle calcaire).
PU-03	1.00 – 4.00	Sable graveleux moyennement compact sous la dalle.
PU-04	0.00 – 4.00	Alluvions sablo-graveleuses (zone oued BV47) – compact avec galets.
PU-05	0.00 – 4.00	Sable fin + argile sableuse (zone plaine – BV44/BV45) – peu compact en surface.

Source : Rapport de la campagne géotechnique APD – Section 04, Aïn Sâlah–Tamanrasset.

IX.3.2. Synthèse des résultats géotechniques

Le profil géotechnique du tronçon de la Section 04 révèle une stratigraphie en deux à trois couches successives, cohérente avec la géologie du Hoggar :

- Couche supérieure (0 – 2 m) : sables éoliens fins à moyens peu compacts, localement encroûtés (dalle calcaire). Teneur en gypse variable (1.5 – 5.0 %). Classe GTR : D2–B3 à D1, Classe UIC : QS2 à QS1.
- Couche intermédiaire (2 – 12 m) : sables grossiers à graveleux compacts, parfois avec passées argileuses sableuses dans les zones d'oueds. Bonne portance générale. Classe GTR : D2–B3, Classe UIC : QS2.
- Couche profonde (> 12 m) : substratum rocheux de grès quartzitique à grès compact – rocher sain. Classe GTR : R, Classe UIC : QS3.

Le tableau ci-dessous présente la synthèse des résultats géotechniques issus des sondages carottés :

Tableau IX.2 – Synthèse des résultats géotechniques sur les sondages carottés

PK	N° S C	Pro f. De (m)	Pro f. À (m)	W (%)	γ_d (t/m ³)	γ_h (t/m ³)	<2m m (%)	<80 μ m (%)	W L (%)	W P (%)	Ip (%)	C (bar)	ϕ (°)	Cc (%)	Clas se GTR	Clas se UIC
410+750	SC - 01	0.00	2.00	4.5	1.65	1.73	100	18	—	—	NP	—	35	—	D2–B3	QS2
410+750	SC - 01	2.00	10.00	3.2	1.80	1.86	100	8	—	—	NP	—	37	—	D2–B3	QS2
412+300	SC - 02	0.00	1.50	5.1	1.60	1.68	100	22	—	—	NP	0.02	33	—	D2–B3	QS2
412+300	SC - 02	1.50	8.00	4.0	1.75	1.82	100	12	—	—	NP	—	35	—	D2–B3	QS2
412+300	SC - 02	8.00	15.00	2.1	1.90	1.94	95	5	—	—	NP	—	40	—	R	QS3
416+800	SC - 03	0.00	3.00	6.2	1.72	1.83	100	15	—	—	NP	0.05	32	—	D2–B3	QS2
416+800	SC - 03	3.00	12.00	8.4	1.68	1.82	100	28	34	17	17	0.10	28	12.5	A1–D1	QS1

PK	N° S C	Pro f. De (m)	Pro f. À (m)	W (%)	γ_d (t/m ³)	γ_h (t/m ³)	<2mm (%)	<80 μ m (%)	W _L (%)	W _P (%)	I _p (%)	C (bar)	ϕ (°)	C _c (%)	Clas se GTR	Clas se UIC
416+800	SC - 03	12.00	20.00	1.8	2.10	2.14	80	3	—	—	NP	—	42	—	R	QS3
420+800	SC - 04	0.00	4.00	5.5	1.70	1.79	100	20	—	—	NP	0.03	34	—	D2-B3	QS2
420+800	SC - 04	4.00	10.00	7.8	1.64	1.77	100	32	38	19	19	0.12	26	14.3	A2	QS1
423+700	SC - 05	0.00	3.00	5.0	1.78	1.87	100	10	—	—	NP	—	36	—	D2-B3	QS2
423+700	SC - 05	3.00	15.00	3.5	1.85	1.91	98	6	—	—	NP	—	38	—	D2-B3	QS2
426+500	SC - 06	0.00	4.00	8.1	1.62	1.75	100	35	42	21	21	0.15	24	16.8	A2	QS1
426+500	SC - 06	4.00	12.00	9.5	1.58	1.73	100	42	48	23	25	0.22	22	18.2	A2-A3	QS1
426+500	SC - 06	12.00	20.00	2.5	1.95	2.00	85	4	—	—	NP	—	40	—	R	QS3

Légende : W = teneur en eau naturelle ; γ_d = densité sèche ; <2mm = passant à 2mm ; <80 μ m = passant à 80 μ m ; W_L = limite de liquidité ; W_P = limite de plasticité ; I_p = indice de plasticité ; C = cohésion ; ϕ = angle de frottement ; C_c = indice de compression. NP = Non plastique ; — = essai non réalisé.

Tableau IX.3 – Synthèse des résultats géotechniques sur les puits de reconnaissance

PK	N° PU	Prof. (m)	<2mm (%)	<80 μ m (%)	W (%)	W _L (%)	W _P (%)	I _p (%)	VBS	Classe GTR	Classe UIC
410+644	PU-01	0.0 – 3.0	100	15	4.5	—	—	NP	0.15	D2-B3	QS2

PK	N° PU	Prof. (m)	<2mm (%)	<80µm (%)	W (%)	WL (%)	WP (%)	Ip (%)	VBS	Classe GTR	Classe UIC
411+500	PU-02	0.0 – 3.5	100	10	3.8	—	—	NP	0.10	D2–B3	QS2
413+200	PU-03	0.0 – 3.0	100	12	5.2	—	—	NP	0.18	D2–B3	QS2
414+700	PU-04	0.0 – 3.5	100	20	6.0	—	—	NP	0.25	D2–B3	QS2
417+450	PU-05	0.0 – 4.0	100	28	7.5	36	18	18	0.60	A1–D1	QS1
420+300	PU-06	0.0 – 4.0	100	25	6.8	—	—	NP	0.30	D2–B3	QS2
421+000	PU-07	0.0 – 3.5	100	32	8.2	40	20	20	0.75	A2	QS1
422+700	PU-08	0.0 – 4.0	100	18	5.5	—	—	NP	0.20	D2–B3	QS2
424+600	PU-09	0.0 – 4.0	100	38	9.1	44	22	22	1.20	A2	QS1
426+000	PU-10	0.0 – 4.0	100	42	10.5	48	23	25	1.50	A2–A3	QS1
426+957	PU-11	0.0 – 4.0	100	45	11.2	50	24	26	1.80	A2–A3	QS1
427+200	PU-12	0.0 – 3.0	100	16	4.8	—	—	NP	0.18	D2–B3	QS2

Légende : VBS = valeur au bleu de méthylène ; NP = Non plastique.

Tableau IX.4 – Analyse chimique des échantillons prélevés

PK	N° Sondage	Prof. De-À (m)	Sulfate SO_4^{2-} (%)	Chlorure Cl^- (%)	Carbonate CaCO_3 (%)	Classification / CaCO_3	Classe d'agressivité
410+750	SC-01	2.00 – 3.00	0.45	0.18	—	Sable	A1
412+300	SC-02	1.50 – 3.00	0.52	0.21	—	Sable graveleux	A1
416+800	SC-03	3.00 – 5.00	0.38	0.15	—	Sable argileux	A1
420+800	SC-04	4.00 – 6.00	1.12	0.28	—	Sable argileux	A2
423+700	SC-05	2.00 – 4.00	0.60	0.22	—	Sable graveleux	A1
426+500	SC-06	0.00 – 2.00	1.85	0.35	18.5	Marne sableuse	A2
426+500	SC-06	4.00 – 8.00	2.40	0.42	22.0	Marne sableuse	A2–A3
426+957	PU-11	0.00 – 4.00	2.10	0.38	20.0	Marne sableuse	A2

IX.3.3. Interprétation des résultats

L'analyse des résultats de la campagne géotechnique conduit aux conclusions suivantes :

- D'après la classification française GTR, les sols de classe D2–B3 (sables grossiers à graviers, peu sensibles à l'eau) prédominent sur la majeure partie du tracé (PK 410+500 –

PK 423+000 et PK 424+000 – PK 427+239 en zones rocheuses). Ces matériaux présentent un excellent potentiel de réutilisation en remblai.

- Des sols de classe A1–A2 (sables argileux, sensibles à l'eau) apparaissent localement dans les zones de fond d'oued (PK 416+500 – PK 418+000, PK 420+500 – PK 421+500, PK 424+000 – PK 427+100). Leur teneur en fines ($< 80 \mu\text{m}$) dépasse 28 % et l'indice de plasticité I_p atteint 17 à 26 %.
- D'après la classification UIC 719R, la classe de portance dominante est QS2 (sol moyen) sur les zones sablo-graveleuses, et QS1 (sol médiocre) dans les zones argileux-sableuses des fonds d'oueds. Le substratum rocheux est classé QS3 (bonne portance) partout où il affleure.
- D'après les essais Proctor modifié, les valeurs de densité sèche optimale γ_{dOPM} varient entre 1.65 et 2.10 t/m³, et les teneurs en eau optimales WOPM entre 3.2 % et 11.2 %, cohérentes avec la nature sableuse à graveleuse des matériaux du Hoggar.
- La compressibilité des sols (essai œdométrique) est modérée dans les zones sablo-argileuses des fonds d'oueds ($C_c = 12$ à 18 %), et nulle dans les formations sableuses et rocheuses.
- Les sols sont en général peu agressifs vis-à-vis du béton (classe A1 à A2), à l'exception de quelques zones d'oueds où les teneurs en sulfates atteignent 2.4 % (classe A2–A3) nécessitant des précautions particulières.
- Les valeurs VBS sont inférieures à 1.5 sur la quasi-totalité du tracé (sables propres), sauf dans les zones argileuses des fonds d'oueds (VBS = 1.2 à 1.8) où un géotextile anticontaminant est préconisé.

IX.4. Localisation des zones à risques

IX.4.1. Zones de faible portance QS0

L'analyse des résultats des puits de reconnaissance et des essais au pénétromètre dynamique a révélé des zones locales à portance insuffisante (Ev_2 estimé $< 20 \text{ MPa}$, $CBR < 5 \%$), classées QS0. Ces zones correspondent aux fonds d'oueds à matériaux fins argileux saturables.

Le tableau ci-dessous recense les sections de faible portance identifiées sur le tracé :

Tableau IX.5 – Sections de faible portance QS0 et solutions préconisées

Localisation PK	Classe du sol	Solution préconisée
PK 417+300 – PK 418+000	QS0 (local)	Excavation de 1.0 m de profondeur et remplacement par matériau de meilleure portance ($CBR > 15 \%$, $Ev_2 > 30 \text{ MPa}$). Compactage à 95 % OPN.
PK 424+000 – PK 425+000 (Zone oued BV47)	QS0	Excavation de 1.0 m + substitution par GNT QS2/QS3 + géotextile anticontaminant 200 g/m ² .

Localisation PK	Classe du sol	Solution préconisée
PK 426+000 – PK 427+100 (Zone oued BV54)	QS0	Excavation de 1.0 à 1.5 m + substitution GNT QS3 + géotextile + enrochement pied de talus remblai.

IX.4.2. Zones inondables

Les zones les plus exposées aux risques d'inondation correspondent aux zones de franchissement des bassins versants majeurs. D'après l'étude hydrologique (Chapitre Hydrologie & Hydraulique), les débits centennaux les plus significatifs sont :

- BV44 au PK 420+675 : $Q_{100} = 43.69 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{Dalot } (4 \times 3) \times 2$;
- BV47 au PK 423+675 : $Q_{100} = 32.23 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{Dalot } (3 \times 2) \times 3$;
- BV54 au PK 426+957 : $Q_{100} = 130.7 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{Dalot } (6 \times 4) \times 4$ — ouvrage majeur.

Les remblais dans ces zones seront protégés par des enrochements au pied de talus et la plateforme sera conçue avec un géotextile anticontaminant et une couche de forme QS3 renforcée.

IX.4.3. Agressivité chimique du sol

Les analyses chimiques ont révélé que le sol est non organique sur l'ensemble du tracé. L'agressivité vis-à-vis du béton est modérée (classe A1 à A2) sur la majorité du tracé, avec des zones locales plus agressives (classe A2–A3) au droit des fonds d'oueds argileux (PK 420+500 – 427+100).

Les prescriptions suivantes s'appliquent pour la fabrication du béton au contact du sol :

- Classe A1 ($\text{SO}_4^{2-} < 0.6 \%$) : ciment CEM II ordinaire acceptable avec dosage $\geq 300 \text{ kg/m}^3$;
- Classe A2 ($0.6 \% \leq \text{SO}_4^{2-} \leq 1.5 \%$) : ciment CEM III ou CRS (résistant aux sulfates), dosage $\geq 350 \text{ kg/m}^3$, rapport E/C ≤ 0.50 ;
- Classe A2–A3 ($\text{SO}_4^{2-} > 1.5 \%$) : ciment CRS obligatoire, résistance minimale C30/37, enrobage armatures $\geq 40 \text{ mm}$.

IX.4.4. Phénomène d'ensablement

La zone d'étude est soumise aux vents de sable caractéristiques du Sahara central. Les vents dominants sont orientés NE–SW avec des vitesses pouvant atteindre 4.7 m/s. Ce phénomène est particulièrement prégnant entre PK 418+000 et PK 421+500 (zone de dunes éoliennes).

Les mesures préventives préconisées sont :

- Préférence aux dalots rectangulaires sur les buses circulaires pour faciliter l'entretien et le curage ;
- Mise en place de dispositifs anti-ensablement (seuils de dégraissage, palissades parallèles à la voie) dans les zones exposées ;
- Compactage soigné et protection de surface de la plateforme par une grave naturelle traitée.

IX.5. Gîtes d'emprunts et carrières

Dans le cadre du projet, une recherche de matériaux d'emprunt et de carrières a été effectuée sur la base de la carte géologique et des observations de terrain aux abords du tracé. Les sources de matériaux identifiées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IX.6 – Gîtes d'emprunts et carrières proposés

Source	Nature de roche	Classe GTR	Classe UIC	Utilisation possible
Gîte d'emprunt local (lit d'oued Hoggar)	Sable grossier alluvionnaire + gravier	D2–B3	QS2	Remblai courant – corps de remblai
Carrière grès quartzitique (Hoggar)	Grès quartzitique concassé	R	QS3	Ballast, sous-ballast, couche de fondation, couche de forme
Encroûtement calcaire local	Calcaire gréseux	R	QS3	Couche de fondation, couche de forme (GNT)

Les matériaux d'emprunt (sables grossiers alluviaux) sont réutilisables en remblai courant sous réserve d'un compactage conforme (≥ 95 % OPN) et d'une vérification de leur teneur en gypse (< 5 % recommandé selon norme UIC 719f).

IX.6. Vérification de stabilité des talus

La vérification de la stabilité des talus a été réalisée à l'aide du logiciel GEO5 en utilisant la méthode de Bishop pour les ruptures circulaires. Les paramètres géotechniques adoptés pour le calcul sont les suivants :

- Poids spécifique $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$ (sable grossier + gravier) ;
- Cohésion : $C = 10 \text{ kPa}$ (sable légèrement argileux) ;
- Angle de frottement interne : $\phi = 30^\circ$;
- Absence de nappe phréatique permanente le long du tracé.

Les facteurs de sécurité minimaux à respecter sont :

- $FS \geq 1.5$ à long terme (condition drainée) ;
- $FS \geq 1.3$ à court terme (condition non drainée) ;
- $FS \geq 1.0$ en situation sismique (Zone 0 – sismicité nulle).

IX.6.1. Cas déblai

Le calcul de stabilité des talus en déblai a été effectué pour la hauteur de déblai maximale rencontrée sur le tracé ($H \approx 12 \text{ m}$) avec une pente de 2H/1V. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IX.7 – Résultats de calcul de stabilité du talus en déblai (pente 2H/1V)

Condition de calcul	FS exigé	FS calculé (GEO5)	Vérification
Court terme (non drainé)	$FS \geq 1.30$	1.42	✓ Vérifiée
Long terme (drainé)	$FS \geq 1.50$	1.65	✓ Vérifiée

La pente de 2H/1V est donc adoptée pour tous les talus en déblai du projet.

IX.6.2. Cas remblai

Pour les remblais d'une hauteur maximale de 15 m (zones BV44, BV51, BV54), le calcul de stabilité donne les résultats suivants avec une pente de 3H/2V :

Tableau IX.8 – Résultats de calcul de stabilité du talus en remblai (pente 3H/2V)

Condition de calcul	FS exigé	FS calculé (GEO5)	Vérification
Long terme (drainé)	$FS \geq 1.50$	1.58	✓ Vérifiée

La pente de 3H/2V est adoptée pour les remblais courants. Dans les zones inondables (BV47, BV54), un enrochement de protection du pied de talus sera mis en place.

IX.7. Conclusion

L'étude géologique et géotechnique de la Section 04 de la ligne ferroviaire Aïn Sâlah – Tamanrasset (PK 410+500 – PK 427+329) a permis d'établir les conclusions suivantes :

- La zone d'étude est géologiquement stable (Zone sismique 0) avec un socle précambrien rigide du Hoggar. Aucun risque sismique significatif n'est à craindre.
- Les formations géologiques dominantes sont les sables grossiers à graveleux et les grès quartzitiques, conférant au terrain une bonne portance générale. La classe de portance dominante est QS2 (sol moyen), avec des zones locales QS3 (rocher) et des zones QS1 à QS0 dans les fonds d'oueds.
- Des zones de faible portance (QS0) ont été identifiées localement au droit des grands oueds (BV47 et BV54). Ces zones nécessitent une excavation de 1.0 m et une substitution par un matériau de qualité QS2/QS3 avant la mise en remblai.
- L'agressivité chimique du sol est faible à modérée (A1 à A2). Des précautions spéciales (ciment CRS, rapport E/C ≤ 0.5) sont requises pour les bétons des ouvrages en contact avec le sol dans les zones d'oueds.
- Le risque d'ensablement est réel entre PK 418+000 et PK 421+500. Des dispositions constructives adaptées (palissades, dalots préférés aux buses) ont été intégrées dans la conception.

- La stabilité des talus est vérifiée avec une pente de 2H/1V en déblai et 3H/2V en remblai, conformément aux recommandations de la SNTF et au calcul GEO5 (méthode de Bishop).

Les gîtes d'emprunts et carrières identifiés aux abords du tracé sont suffisants pour couvrir les besoins en matériaux de remblai (sables alluviaux QS2) et en matériaux de couche d'assise (grès quartzitique QS3).

CHAPITRE X : ASSISE FERROVIAIRE

CHAPITRE X : ASSISE FERROVIAIRE

X.1. Introduction

La conception de l'assise ferroviaire constitue une étape déterminante dans la réalisation d'une infrastructure de voie ferrée. Elle vise à garantir la stabilité mécanique, le drainage et la durabilité de la voie sous l'action répétée des charges dynamiques des trains et des contraintes environnementales propres au milieu aride saharien.

Le présent chapitre traite du dimensionnement de la structure d'assise de la Section 04 de la ligne ferroviaire à voie unique Aïn Sâlah – Tamanrasset s'étendant du PK 410+500 au PK 427+239 (16.80 km), dans le massif du Hoggar, wilaya de Tamanrasset. Ce dimensionnement s'appuie directement sur les résultats de l'étude géologique et géotechnique (Chapitre précédent) et est mené conformément aux prescriptions de la fiche UIC 719R « Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaire ».

La ligne est conçue pour une vitesse maximale $V_{max} = 220$ km/h (voyageurs) et une vitesse minimale $V_{min} = 100$ km/h (marchandises). Cette plage de vitesse, avec $V_{max} > 160$ km/h, entraîne une majoration des épaisseurs des couches d'assise par rapport aux lignes classiques, conformément au code UIC 719R.

Les objectifs de ce chapitre sont les suivants :

- Décrire les différentes couches constituant le corps d'assise ferroviaire et leurs rôles respectifs ;
- Déterminer la classe de portance de la plateforme en fonction des résultats géotechniques du tracé ;
- Calculer les épaisseurs minimales des couches d'assise selon la formule UIC 719R ;
- Proposer la structure de voie adaptée à chaque zone géotechnique de la Section 04 ;
- Définir les dispositions constructives spéciales pour les zones sensibles (faible portance, inondables, ensablement).

X.2. Différentes couches de l'assise ferroviaire

L'assise ferroviaire est l'ensemble des couches interposées entre la superstructure (rails, traverses) et la plateforme. Elle assure la répartition des charges, l'amortissement des vibrations, le drainage et la protection de la voie. L'épaisseur et la nature de ces couches dépendent de plusieurs paramètres :

- Les caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques de la plateforme (nature du sol, portance, sensibilité à l'eau) ;
- Les conditions climatiques locales (aridité saharienne, vents de sable, crues éclairs) ;
- Le trafic ferroviaire prévu (charges à l'essieu, vitesse de circulation) ;
- L'armement de la voie (type de rails, nature et espacement des traverses).

X.2.1. Le ballast

Le ballast est un granulat de pierres concassées de forme polyédrique à arêtes vives, à fort angle de frottement interne (ϕ élevé) et à faible cohésion ($C \approx 0$). Il constitue la couche la plus haute de l'assise, directement en contact avec les traverses.

Pour la Section 04, le ballast doit satisfaire aux normes SNTF et à la norme NF EN 13450 (classe 31.5/50 mm selon les prescriptions algériennes). Compte tenu de la vitesse maximale $V_{\max} = 220$ km/h ($V > 160$ km/h), les exigences de qualité sont renforcées par rapport aux lignes classiques. Les critères de qualité exigés sont les suivants :

- Granulométrie : classe 25/50 mm, conforme à la norme européenne CEN/TC 154 et aux spécifications SNTF ;
- Résistance à la fragmentation Los Angeles (LA) : $\leq 19 \%$;
- Résistance à l'usure Micro-Deval en présence d'eau (MDE) : $\leq 6 \%$;
- Résistance à la compression (RC) : $\geq 1\,200$ kg/cm² ;
- Propreté : teneur en fines (< 0.5 mm) $\leq 0.5 \%$;
- Forme angulaire et rugosité assurant la cohésion de la masse ballast/traverse.

Le ballast de la Section 04 proviendra de la carrière de grès quartzitique identifiée dans le massif du Hoggar (Tableau II.6 – Chapitre géotechnique), dont les matériaux classés R / QS3 présentent d'excellentes caractéristiques mécaniques pour cet usage.

Les rôles principaux du ballast sont :

- Répartition uniforme des charges des trains sur la plateforme ;
- Maintien du nivellement et du dressage de la voie ;
- Drainage rapide des eaux de pluie et de surface ;
- Amortissement des vibrations dynamiques par frottement inter-granulaire ;
- Prévention de la croissance végétale sous la voie.

X.2.2. La sous-couche

La sous-couche est une couche intermédiaire interposée entre le ballast et la plateforme. Elle peut être mono ou multicouche et comprend, de haut en bas :

- Une couche de sous-ballast en grave propre bien graduée (0/31.5 mm) ;
- Une couche de fondation en grave sableuse concassée pour les zones à sol médiocre ;
- Une couche anti-contaminante (sable propre ou géotextile) dans les zones à risque de contamination fines/argiles (QS0/QS1).

Les rôles de la sous-couche sont :

- Amélioration de la portance et meilleure répartition des charges transmises à la plateforme ;
- Protection anti-contamination entre plateforme et ballast (empêcher la remontée de fines et le poinçonnement par le ballast) ;
- Contribution à l'amélioration des propriétés vibratoires ;
- Protection contre l'érosion et le gel ;
- Amélioration du drainage longitudinal et transversal.

X.2.3. La couche anti-contaminante

La couche anti-contaminante est constituée de sable propre ($d_{50} > 0.2$ mm, teneur en fines < 5 %). Elle est complétée par un géotextile non-tissé (200 g/m^2) dans les zones de plateforme de qualité médiocre (QS0/QS1) afin de séparer les matériaux fins argileux de la plateforme du ballast.

Sur la Section 04, cette couche est impérative dans les zones suivantes, conformément aux résultats géotechniques :

- PK 417+300 – PK 418+000 (zone QS0 – argile sableuse fond d'oued BV44) ;
- PK 424+000 – PK 425+000 (zone QS0 – fond d'oued BV47) ;
- PK 426+000 – PK 427+100 (zone QS0/QS1 – fond d'oued BV54, matériaux argileux à $I_p = 21-25$ %, $VBS = 1.2-1.8$).

X.2.4. La plateforme et la couche de forme

La plateforme est la surface support de toute l'assise ferroviaire. Elle est constituée des terres rapportées (remblai) ou du sol en place (déblai). Sa qualité conditionne directement l'épaisseur des couches d'assise et la classe de portance attribuée.

Pour évaluer la qualité de la plateforme, il convient :

- D'apprécier la nature géotechnique de chaque sol (granularité pour sols meubles, dureté pour sols rocheux) ;
- D'évaluer les conditions hydrogéologiques et hydrologiques locales (nappe phréatique, drainage, percolations).

La couche de forme est une couche amélioratrice placée sur la plateforme afin d'améliorer sa classe de portance. Elle est constituée de matériaux de meilleure qualité que le sol en place (généralement QS3 = grave naturelle traitée). Son utilisation est déclenchée lorsque le sol naturel est de qualité QS1 ou QS2 et que l'on souhaite atteindre une classe de plateforme P2 ou P3.

X.3. Classification des sols de la plateforme – Section 04

D'après les résultats de l'étude géotechnique (Chapitre précédent), les sols rencontrés sur le tracé de la Section 04 sont classés selon la norme GTR et la fiche UIC 719R. Le tableau ci-dessous synthétise les classes de qualité de sol par zone :

Les classes identifiées sont les suivantes :

- QS3 (bon sol) : substratum rocheux de grès quartzitique (PK 410+500 – PK 413+500, PK 412+300 – SC-02 à 8–15 m, PK 416+800 – SC-03 à 12–20 m). Ev_2 estimé > 80 MPa.
- QS2 (sol moyen) : sables grossiers alluviaux à graviers compacts (majeure partie du tracé, PK 413+500 – PK 424+000, zones non argileuses). Ev_2 estimé 30–60 MPa.
- QS1 (sol médiocre) : sables argileux à argiles sableuses des fonds d'oueds (PK 416+500–418+000, PK 420+500–421+500, PK 424+000–427+100). $I_p = 17-25$ %, Ev_2 estimé 10–25 MPa.
- QS0 (sol impropre – local) : matériaux fins argileux saturables au droit des oueds principaux (BV44, BV47, BV54). $CBR < 5$ %, $Ev_2 < 20$ MPa – substitution obligatoire.

Conformément aux prescriptions UIC 719R (§ traitement des zones QS0), les zones à portance insuffisante doivent être traitées par excavation et substitution avant la mise en place des couches d'assise. Après traitement, la totalité du tracé est classée QS1 à QS3.

X.4. Partie Supérieure de Terrassement (PST) et Arase de Terrassement (AR)

Selon la classification GTR et en tenant compte de l'état hydrique des sols, les classes d'arase ont été déterminées pour l'ensemble des déblais et des remblais de la Section 04 :

- Classe AR1 : applicable aux zones sablo-graveleuses compactes (QS2/QS3) – la majorité du tracé (PK 410+500 – PK 424+000). Aucune amélioration complémentaire requise.
- Classe AR0 → amélioration requise : zones argileuses des fonds d'oueds (QS0/QS1). Nécessite une substitution ou un traitement de surface avant mise en place de la structure d'assise.

Les dispositions suivantes s'appliquent pour les zones AR0 :

- Après décapage et compactage de l'assise naturelle, si $Ev2 < 20$ MPa, procéder à une substitution par matériaux conformes ($Ev2 > 30$ MPa, $K < 2.2$, compactés à 95 % de l'Optimum Proctor Normal – OPN) ;
- Les matériaux de substitution seront issus des gîtes d'emprunt locaux (sables grossiers alluviaux) ou de la carrière de grès quartzitique (QS3), selon disponibilité et résultats des essais de conformité.

X.5. Classe de portance de la plateforme

D'après les spécifications de la fiche UIC 719R (page 16), trois classes de plateforme sont définies en fonction de la capacité portante :

- P1 : plateforme médiocre ;
- P2 : plateforme de qualité moyenne ;
- P3 : plateforme de bonne qualité.

Le tableau suivant présente les classes de portance admissibles en fonction de la qualité du sol et de la couche de forme à mettre en œuvre :

Tableau X.1 – Classe de portance de la plateforme (Normes UIC 719R)

Classe de qualité du sol	Classe de portance de la plateforme	Qualité de la couche de forme	Épaisseur minimale (m)
QS1	P1	QS1	—
QS1	P2	QS2	0.50
QS1	P2	QS3	0.35
QS1	P3	QS3	0.50
QS2	P2	QS2	—
QS2	P3	QS3	0.35
QS3	P3	QS3	—

X.5.1. Plateforme proposée pour la Section 04

Après analyse des résultats géotechniques du tracé et conformément aux prescriptions UIC 719R, la classe de plateforme retenue pour la Section 04 est la classe P2 (plateforme de qualité moyenne), qui constitue le meilleur compromis entre performance et économie pour ce tronçon caractérisé par une dominante de sols QS1 à QS2.

Ce choix est justifié par :

- La prédominance de sols de classe QS1–QS2 sur environ 70 % du linéaire (zones alluvionnaires et éoliennes) ;
- La présence d'un substratum rocheux QS3 dès 8–12 m de profondeur sur les zones rocheuses, limitant les risques de tassement différentiel ;
- L'absence de nappe phréatique permanente et superficielle sur l'ensemble du tracé, ce qui améliore les conditions de comportement hydrique des sols ;
- La mise en œuvre d'une couche de forme QS3 pour réhabiliter les zones QS1 et atteindre la portance P2.

X.5.2. Couche de forme

Pour garantir une plateforme de qualité P2 sur l'ensemble du tracé, une couche de forme de 35 cm d'épaisseur en matériau QS3 (GNT – grave naturelle traitée issue de la carrière de grès quartzitique du Hoggar) est mise en œuvre dans les zones où le sol naturel est de qualité QS1.

Dans les zones QS0 préalablement traitées par substitution (PK 417+300–418+000 et PK 424+000–427+100), la couche de forme est portée à 50 cm de GNT QS3, conformément aux prescriptions du tableau IV.1 (P3 sur QS1 → couche de forme 50 cm QS3).

Dans les zones à substratum rocheux QS3 (PK 410+500–413+500, zones rocheuses), aucune couche de forme n'est nécessaire pour atteindre la classe P3. Une couche de forme de 35 cm sera tout de même mise en œuvre pour assurer la régularité de la plateforme et sa protection contre l'érosion éolienne.

X.6. Calcul des épaisseurs minimales des couches d'assise

X.6.1. Formule de dimensionnement UIC 719R

Conformément à la fiche UIC 719R, l'épaisseur totale « e » du corps d'assise (ballast + sous-couches) est calculée par la formule suivante :

$$e \geq E + a + b + c + d + f + g$$

Avec :

- E : épaisseur de base fonction de la classe de portance de la plateforme (m) ;
- a : correctif lié à la vitesse (lignes à grande vitesse $V > 160$ km/h) ;
- b : correctif lié au type de traverse (béton, bois, métal) et à sa longueur L ;
- c : correctif pour la nature du dimensionnement (normal ou renforcé) ;
- d : correctif lié à la charge nominale à l'essieu ;
- f : correctif lié à la vitesse et à la classe de plateforme ;

- g : correctif pour la présence ou non d'un géotextile.

X.6.2. Application à la Section 04

Les valeurs des paramètres ont été choisies conformément à la fiche UIC 719R et aux caractéristiques techniques de la ligne Aïn Sâlah – Gare Molaye Lhecen (voie unique, charges à l'essieu 22.5 t, traverses béton monobloc L = 2.24 m, vitesse maximale de conception $V_{max} = 220$ km/h > 160 km/h) :

Tableau X.2 – Paramètres de dimensionnement de la couche d'assise (UIC 719R)

Paramètre	Valeur (m)	Critère de choix
E	0.55	Plate-forme de classe de portance P2
a	0.00	Vitesse $V_{max} = 220$ km/h > 160 km/h → correctif vitesse ligne rapide
b	0.13	Traverses en béton monobloc de longueur L = 2.24 m
c	0.00	Dimensionnement normal (nouvelle ligne)
d	0.05	Charge nominale d'essieu de 22.5 t/essieu
f	0.05	Plateforme P2 avec $V_{max} = 220$ km/h
g	0.00	Pas de géotextile dans les zones QS2/QS3
e total	0.78 m	Épaisseur totale requise ballast + sous-couches (majorée pour $V > 160$ km/h)

L'épaisseur totale minimale requise est donc $e = 0.78$ m, à répartir entre le ballast et les sous-couches.

X.7. Structure de voie retenue – Application au projet

X.7.1. Épaisseur de la couche de ballast

Conformément aux prescriptions UIC 719R et aux recommandations SNTF, l'épaisseur minimale de la couche de ballast est fixée en fonction de la vitesse de conception. Pour la Section 04 ($V_{max} = 220$ km/h > 160 km/h), l'épaisseur minimale du ballast est portée à 35 cm (mesurée sous la semelle de la traverse), contre 30 cm pour les lignes à vitesse inférieure à 160 km/h.

Le ballast sera de classe granulaire 25/50 mm, issu du concassage de grès quartzitique de la carrière du Hoggar, conforme à la norme NF EN 13450. Les exigences minimales à vérifier en cours d'approvisionnement sont : résistance à la fragmentation Los Angeles (LA) ≤ 19 % et résistance à l'usure Micro-Deval (MDE) ≤ 6 %.

X.7.2. Sous-couches retenues

La répartition de l'épaisseur restante ($0.78 - 0.30 = 0.48$ m) entre les différentes sous-couches a été optimisée en tenant compte de la disponibilité des matériaux locaux et des conditions de chantier. La structure retenue est la suivante :

- Sous-ballast : 25 cm de grave propre bien graduée 0/31.5 mm (concassé ou alluvionnaire criblé propre) ;
- Couche de fondation : 25 cm de grave sableuse entièrement concassée 0/20 mm ;
- Couche de forme (QS3) : 35 cm de GNT (grave naturelle traitée) – grès quartzitique concassé de la carrière Hoggar.

Total ballast + sous-couches : $30 + 25 + 25 = 80$ cm $\rightarrow$ conforme à l'exigence $e = 0.78$ m pour $V_{\max} = 220$ km/h.

X.7.3. Tableau récapitulatif de la structure de voie

Tableau X.3 – Structure de voie retenue pour la Section 04 (PK 410+500 – PK 427+500)

Couche	Épaisseur (cm)	Matériaux
Ballast	30	Grave concassée (GC) 25/50 mm – norme NF EN 13450
Sous-ballast	25	Grave propre bien graduée 0/31.5 mm
Couche de fondation	25	Grave sableuse entièrement concassée 0/20 mm
Couche de forme (QS3)	35	Grave naturelle traitée (GNT) – grès quartzitique concassé (carrière Hoggar)
Géotextile anticontaminant	—	200 g/m ² – zones QS0/QS1 (PK 417+300–418+000, PK 424+000–427+100)
TOTAL ballast + sous-couches (hors couche de forme)	80 cm	Conforme à l'exigence UIC 719R : $e = 0.78$ m ($V_{\max} = 220$ km/h)

Note : L'épaisseur totale de la couche de forme est de 35 cm pour les zones QS2 (atteignant P2) et de 50 cm pour les zones QS0/QS1 traitées par substitution (atteignant P3). Dans ces dernières zones, une couche de géotextile non-tissé 200 g/m² est intercalée entre la plateforme et la couche de forme.

X.8. Dispositions constructives pour les zones sensibles

X.8.1. Zones de faible portance – Traitement des QS0

Trois zones de portance insuffisante (QS0) ont été identifiées lors de l'étude géotechnique. Les dispositions suivantes sont préconisées avant mise en place de la structure d'assise standard :

- PK 417+300 – PK 418+000 : Excavation de 1.0 m de profondeur ; remplacement par sable grossier alluvionnaire ($\text{CBR} > 15 \%$, $\text{Ev2} > 30 \text{ MPa}$) compacté à 95 % OPN ; géotextile anticontaminant 200 g/m^2 ; couche de forme 50 cm GNT QS3.
- PK 424+000 – PK 425+000 (zone oued BV47) : Excavation de 1.0 m ; substitution par GNT QS3 ; géotextile 200 g/m^2 ; couche de forme 50 cm ; protection pied de talus remblai par enrochements (dalot $(3 \times 2) \times 3$).
- PK 426+000 – PK 427+100 (zone oued BV54) : Excavation de 1.0 à 1.5 m ; substitution GNT QS3 ; géotextile 200 g/m^2 ; couche de forme 50 cm ; enrochements pied de talus ; ciment CRS obligatoire pour tous les ouvrages en béton ($\text{SO}_4^{2-} = 2.10\text{--}2.40 \%$, classe A2–A3) ; dalot majeur $(6 \times 4) \times 4$ dimensionné pour $Q_{100} = 130.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

X.8.2. Zones inondables – Protection des remblais

Les remblais situés dans les zones de franchissement des bassins versants majeurs (BV44, BV47, BV54) nécessitent des dispositions constructives spéciales pour résister aux crues centennales :

- Protection des talus de remblai par enrochements (épaisseur $\geq 0.50 \text{ m}$, $d_{50} \geq 0.30 \text{ m}$) sur les faces exposées aux écoulements ;
- Mise en place d'un géotextile antiérosion entre le corps de remblai et les enrochements ;
- Compactage renforcé du corps de remblai ($\geq 95 \%$ OPN) dans les zones inondables ;
- Plateforme conçue avec dévers transversal de 4 % orienté vers les fossés pour évacuation rapide des eaux de ruissellement.

X.8.3. Zone d'ensablement éolien (PK 418+000 – PK 421+500)

La zone de dunes éoliennes entre PK 418+000 et PK 421+500 est soumise à un ensablement chronique (vents NE–SW, vitesse $\leq 4.7 \text{ m/s}$). Les dispositions suivantes sont intégrées à la conception de l'assise :

- Protection de surface de la plateforme par une grave naturelle traitée (GNT) compactée évitant le colmatage du ballast par les sables fins ;
- Mise en place de palissades parallèles à la voie (distance $\geq 15 \text{ m}$ de l'axe) pour dévier les flux éoliens ;
- Préférence accordée aux dalots rectangulaires sur les buses circulaires pour faciliter le curage ;
- Compactage soigneux et protection de la plateforme par une couche de grave traitée affleurant la surface.

X.8.4. Aggressivité chimique du sol

Les analyses chimiques de l'étude géotechnique ont révélé des teneurs en sulfates élevées dans les zones des fonds d'oueds ($\text{SO}_4^{2-} = 1.12\text{--}2.40 \%$). Les prescriptions suivantes s'appliquent pour la fabrication des bétons en contact avec le sol dans l'assise et les ouvrages d'assainissement :

- Classe A1 ($\text{SO}_4^{2-} < 0.6 \%$) – PK 410+500 à PK 420+500 : ciment CEM II ordinaire, dosage $\geq 300 \text{ kg/m}^3$;
- Classe A2 ($0.6 \% \leq \text{SO}_4^{2-} \leq 1.5 \%$) – PK 420+500 à PK 424+000 : ciment CEM III ou CRS, dosage $\geq 350 \text{ kg/m}^3$, rapport E/C ≤ 0.50 ;
- Classe A2–A3 ($\text{SO}_4^{2-} > 1.5 \%$) – PK 424+000 à PK 427+500 : ciment CRS obligatoire, résistance minimale C30/37, enrobage armatures $\geq 40 \text{ mm}$.

X.9. Synthèse par zone géotechnique – Structure d'assise adoptée

Tableau X.4 – Synthèse de la structure d'assise par zone PK

Zone (PK)	Classe sol	Classe plateforme	Couche de forme	Observations
PK 410+500 – PK 413+500	QS2/QS3	P2 / P3	35 cm GNT	Zone rocheuse (grès quartzitique) – bon support
PK 413+500 – PK 418+000	QS2	P2	35 cm GNT	Alluvions compactes – support moyen
PK 417+300 – PK 418+000	QS0 / QS1	P1 → P2*	50 cm GNT + géotextile	Zone faible portance – substitution 1.0 m + géotextile 200 g/m ²
PK 418+000 – PK 421+500	QS1/QS2	P2	35–50 cm GNT	Zone éolienne (dunes) – anti-ensablement requis
PK 421+500 – PK 424+000	QS2	P2	35 cm GNT	Alluvions compactes (lits d'oueds anciens)
PK 424+000 – PK 427+500	QS0 / QS1	P1 → P2*	50 cm GNT + géotextile	Zone oueds BV47/BV54 – inondable – ciment CRS – enrochements

* Après traitement par substitution et mise en place de la couche de forme renforcée (50 cm GNT QS3 + géotextile), la plateforme QS0/QS1 atteint la classe P2.

X.10. Conclusion

Le dimensionnement de l'assise ferroviaire de la Section 04 (PK 410+500 – PK 427+329) a été réalisé en conformité avec les prescriptions de la fiche UIC 719R et en cohérence directe avec les résultats de l'étude géologique et géotechnique du tracé.

L'application de la formule UIC 719R aux caractéristiques de la ligne (voie unique, traverses béton $L = 2.24$ m, charge essieu 22.5 t, $V_{max} = 220$ km/h > 160 km/h) a conduit à une épaisseur totale minimale requise de $e = 0.78$ m.. La structure retenue est la suivante :

- Ballast : 30 cm de grave concassée 25/50 mm (carrière grès quartzitique Hoggar) ;
- Sous-ballast : 25 cm de grave propre 0/31.5 mm ;
- Couche de fondation : 25cm de grave sableuse concassée 0/20 mm ;
- Couche de forme (QS3) : 35 cm de GNT (zones QS2) ou 50 cm (zones QS0/QS1 traitées).

La plateforme retenue est de classe P2 sur la majeure partie du tracé, avec une classe P3 dans les zones à substratum rocheux QS3. Des dispositions constructives spéciales ont été définies pour les trois zones de faible portance (QS0), les zones inondables (oueds BV44, BV47, BV54), la zone d'ensablement éolien (PK 418+000–421+500) et les zones d'agressivité chimique élevée (PK 424+000–427+329). La prise en compte de la vitesse $V_{max} = 220$ km/h garantit une infrastructure ferroviaire adaptée aux exigences des lignes à grande vitesse, conforme aux normes UIC en vigueur en Algérie.

L'ensemble de ces dispositions garantit une infrastructure ferroviaire durable, adaptée aux conditions extrêmes du massif du Hoggar, et conforme aux normes internationales UIC en vigueur en Algérie.

CHAPITRE XI: PROFIL EN TRAVERS

CHAPITRE XI : PROFIL EN TRAVERS

XI.1. Introduction

Le profil en travers est une représentation graphique transversale de la voie ferrée perpendiculairement à l'axe de la ligne. Il constitue l'un des documents fondamentaux du projet de génie civil ferroviaire : il décrit avec précision, pour chaque profil courant, la disposition de toutes les couches constitutives de la chaussée ferroviaire (superstructure et infrastructure), les dimensions géométriques de la plateforme, la pente et la nature des talus, ainsi que le système de drainage transversal associé.

Le présent chapitre traite des profils en travers types et courants de la Section 04 de la ligne ferroviaire à voie unique Aïn Sâlah – Tamanrasset, s'étendant du PK 410+500 au PK 427+329, pour un linéaire total de 16.80 km. Les profils ont été générés sur la base du profil en long de la section et des coupes transversales du terrain naturel.

Les objectifs de ce chapitre sont les suivants :

Définir le profil en travers type retenu pour la pleine voie et justifier ses caractéristiques géométriques ;

Distinguer les configurations de profil selon la nature du terrassement : zone de déblai, zone de remblai, et zone mixte ;

Décrire tous les éléments constitutifs du profil en travers (superstructure, infrastructure, talus, assainissement) ;

Analyser le bilan des volumes de déblai et de remblai et identifier les besoins en matériaux d'apport.

XI.2. Définition et types de profils en travers

XI.2.1. Profil en travers type

Le profil en travers type est une représentation graphique normalisée qui décrit, de façon complète et détaillée, tous les éléments constituant la section transversale de la voie. Il sert de référence pour l'implantation et l'exécution des travaux sur l'ensemble du tracé. Il indique notamment :

Les éléments de superstructure : type de rail (UIC 60), écartement (1 435 mm), type de traverse (béton monobloc), épaisseur et emprise du ballast ;

Les éléments d'infrastructure : dénomination et épaisseur de chaque couche (sous-ballast, couche de fondation, couche de forme), pentes transversales, nature des matériaux ;

Les éléments de talus : inclinaison en déblai et en remblai, bermes éventuelles pour grandes hauteurs ;

Les éléments d'assainissement : fossés longitudinaux trapézoïdaux au pied de talus en déblai, drains en fond de fouille si nécessaire.

XI.2.2. Profil en travers courant

Le profil en travers courant s'applique à chaque abscisse (PK) particulier. Il reprend toutes les données du profil type, auxquelles s'ajoutent les informations spécifiques au point considéré : cote du terrain naturel (TN), cote de projet (arase de terrassement), largeur effective du déblai ou du remblai, hauteur de talus, nature géotechnique locale du sol.

Pour la Section 04, 725 profils courants ont été calculés par le logiciel COVADIS, espacés de 25 m en pleine voie et de 12,5 m en zones de transition ou de grande variation topographique. Les profils repères extraits du listing.

XI.3. Éléments constitutifs du profil en travers

XI.3.1. La superstructure

La superstructure ferroviaire est l'ensemble des composants posés sur le ballast, directement porteurs du matériel roulant. Pour la Section 04, la superstructure adoptée est la suivante :

Rails : type UIC 60 (60 kg/m) à semelle large, en barres longues soudées (LRS) par soudure aluminothermique. Résistance à la rupture ≥ 900 MPa. Inclinaison des rails 1/20.

Traverses : béton monobloc précontraint (norme NF EN 13230), longueur $L = 2,24$ m, espacement 60 cm. Compatible avec les charges à l'essieu de 22,5 t/essieu à $V_{\max} = 220$ km/h.

Attaches : type \vousloh (ou équivalent PANDROL e-clip) à élasticité vérifiée, permettant un réglage de nivellement ± 10 mm.

Écartement : 1 435 mm (voie normale UIC), maintenu par les traverses avec une tolérance de ± 2 mm en service.

La voie est posée en ligne droite avec une inclinaison transversale nulle (dévers = 0) en alignement. En courbe, le dévers est appliqué par sur-élévation du rail extérieur, créant une différence d'épaisseur de ballast entre rive gauche et rive droite.

XI.3.2. La couche de ballast

Le ballast constitue la couche de transition entre les traverses et les sous-couches. Il assure la répartition des charges, le maintien géométrique de la voie, le drainage et l'amortissement des vibrations.

Granulométrie : 25/50 mm (norme NF EN 13450, classe PS/ML) – grave concassée à arêtes vives.

Épaisseur sous la semelle de la traverse : 35 cm (imposée par $V_{\max} = 220$ km/h > 160 km/h, selon UIC 719R).

Emprise transversale : 3,10 m de part et d'autre de l'axe de voie en crête (butées de ballast ≥ 45 cm hors traverse).

Résistance Los Angeles (LA) ≤ 19 % ; Micro-Deval (MDE) ≤ 6 % ; teneur en fines $< 0,5$ %.

Origine : carrière de grès quartzitique du massif du Hoggar (classé R/QS3 – Chapitre géotechnique).

XI.3.3. Les couches de sous-ballast et de forme

Conformément aux résultats du dimensionnement par la formule UIC 719R ($e = 0,78$ m pour $V_{max} = 220$ km/h, plateforme P2), les couches intermédiaires sont les suivantes, de bas en haut :

Couche de forme (QS3) : GNT (grave naturelle traitée) issue de la carrière de grès quartzitique Hoggar. Épaisseur 35 cm en zones QS2 ; 50 cm + géotextile anticontaminant 200 g/m^2 en zones QS0/QS1 (PK 417+300–418+000 et PK 424+000–427+100).

Couche de fondation : grave sableuse entièrement concassée 0/20 mm, épaisseur 20 cm. Module $E_{v2} \geq 80$ MPa après compactage à 97 % OPN.

Sous-ballast : grave propre bien graduée 0/31,5 mm, épaisseur 25 cm. Fonction anticontaminante et drainante. $CBR \geq 30$ % ; teneur en fines < 5 %.

Le dévers transversal des couches d'assise est de 4 %, orienté vers le fossé longitudinal pour assurer l'évacuation rapide des eaux de ruissellement. La géométrie en « chapeau de chinois décentré » est adoptée, avec le décentrement côté droit (préparation à une éventuelle duplication de la voie).

XI.3.4. La plateforme

La plateforme est la surface de la couche de forme, support de l'assise ferroviaire. Pour la Section 04, elle présente les caractéristiques suivantes :

Largeur totale : 8,00 m (asymétrique : 4,70 m côté gauche + 3,30 m côté droit par rapport à l'axe de voie).

Pente transversale : 4 % vers le côté gauche (côté fossé principal) en alignement droit.

Classe de portance : P2 sur l'ensemble du tracé (après mise en œuvre des couches de forme), P3 en zones rocheuses QS3 (PK 410+500–413+500).

Le dévers en courbe est créé en faisant varier l'épaisseur de ballast entre les deux rives, les autres couches restant constantes.

XI.3.5. Les talus

Les talus de déblai et de remblai assurent la stabilité du corps de terrassement. Leur inclinaison est fixée en fonction de la nature des sols de la Section 04, déterminée par l'étude géotechnique :

Inclinaison générale : 3H/2V pour l'ensemble du tracé, adapté aux sols QS1–QS2 (alluvions sablo-graveleuses, dunes compactées). Cette pente douce garantit la stabilité des talus sous les conditions hydriques sahariennes (absence de nappes permanentes, crues saisonnières violentes mais courtes).

Zones rocheuses (PK 410+500–413+500, substratum grès quartzitique QS3) : la pente peut être portée à 1H/1V (100 %) voire la verticale en cas de rocher sain compact, après vérification de la stabilité par analyse à la rupture (méthode de Bishop).

Bermes de décharge : requises pour les talus de hauteur > 8 m. Largeur minimale 2,0 m, pente extérieure 4 % vers l'aval. Sur le tracer, les talus de grande hauteur sont concentrés dans la zone de déblai majeur du PK 425+750–425+850 (profil P658, surface de section 449,3 m²).

Protection des talus en zones inondables (oueds BV44, BV47, BV54) : enrochements libres en pied de talus côté oued, épaisseur $\geq 0,50$ m, $d_{50} \geq 0,30$ m, avec géotextile anti-érosif entre remblai et enrochements.

XI.3.6. L'assainissement transversal

Le drainage est un élément essentiel de la pérennité de la voie. présente des conditions d'aridité extrême mais également des crues éclaires intenses (régime saharo-méditerranéen). Le système d'assainissement transversal comprend :

Fossés longitudinaux en déblai : fossé trapézoïdal en pied de talus côté gauche, section : base $b = 0,50$ m, hauteur $h = 0,50$ m, pente longitudinale $\geq 0,3$ %, revêtus en béton cyclopéen dans les zones à forte érosion. Capacité hydraulique vérifiée pour Q10 (crues décennales).

Contre-fossés en crête de déblai : fossé triangulaire $b = 0,30$ m interceptant le ruissellement des versants avant qu'il n'atteigne le talus de déblai.

Fossés de pied de remblai : collecte des eaux de surface drainées par la plateforme (dévers 4 %) et évacuation vers les ouvrages transversaux.

Couche drainante en fond de fouille : dans les zones où la présence d'eau saisonnière est probable (fonds d'oueds BV44, BV47, BV54), une couche drainante de sable propre 0/4 mm de 15 cm d'épaisseur est mise en œuvre sous la couche de forme, avec collecte vers les cunettes.

XI.4. Profil en travers type retenu

XI.4.1. Caractéristiques géométriques générales

Le profil en travers type adopté pour la Section 04 (PK 410+500 – PK 427+329) est un profil de voie unique mixte électrifiée, conforme aux normes SNTF et aux prescriptions UIC. Il est défini comme suit :

Tableau XI.1 – Caractéristiques du profil en travers type – Pleine voie

Paramètre	Valeur	Observation
Type de ligne	Voie unique mixte électrifiée	—
Écartement des voies	1 435 mm	Norme UIC / SNTF

Paramètre	Valeur	Observation
Largeur de plateforme	8,00 m	Asymétrique : G 4,70 m / D 3,30 m
Dévers transversal plateforme	4 %	Chapeau de chinois décentré (côté D)
Pente des talus	3H / 2V	Déblai et remblai (sol QS1–QS3)
Épaisseur ballast	30 cm	$V_{\max} = 220 \text{ km/h} > 160 \text{ km/h}$
Épaisseur sous-ballast	25 cm	Grave propre 0/31,5 mm
Couche de fondation	25 cm	Grave concassée 0/20 mm
Couche de forme (QS3)	35 cm (zones QS2) / 50 cm (QS0/QS1)	GNT – carrière grès Hoggar
Épaisseur totale assise (UIC 719R)	0,78 m	$e = E+a+b+c+d+f+g$
Fossés longitudinaux	Trapézoïdaux – $b=0,50 \text{ m}$, $h=0,50 \text{ m}$	Pied de talus – zones déblai
Vitesse de conception	$V_{\max} = 220 \text{ km/h}$ / $V_{\min} = 100 \text{ km/h}$	Ligne mixte voyageurs/fret

Le profil est asymétrique en largeur (4,70 m gauche / 3,30 m droit) afin de préparer l'emprise nécessaire à une éventuelle duplication future de la voie côté droit, conformément aux recommandations SNTF pour les lignes nouvelles. La plateforme est conçue avec dévers de 4 % en chapeau de chinois décentré pour assurer l'écoulement des eaux vers le côté gauche (côté du fossé principal).

XI.4.2. Profil type en zone de remblai

En zone de remblai (profil P13 – exemple à PK 410+750,267 – visible sur les coupes COVADIS fournies), le profil type présente une forme trapézoïdale avec les dispositions suivantes :

Corps de remblai compacté par couches successives de 30 cm (compactage ≥ 95 % de l'Optimum Proctor Normal – OPN), matériaux issus des déblais et/ou de gîtes d'emprunt locaux (sable grossier alluvionnaire classé QS2).

Profil trapézoïdal visible sur le profil P13 (PK 410+750,27) : surface de remblai = 21,41 m², avec talus 3H/1V de chaque côté de la plateforme de 8 m. La cote TN est inférieure à la cote projet sur toute la largeur du profil.

Couche de forme GNT QS3 (35 cm) posée directement sur l'arase du remblai compacté. En zones QS0/QS1, substitution préalable 1,0 m + géotextile 200 g/m² avant mise en place de la couche de forme (50 cm).

Fossé de pied de remblai côté gauche recevant les eaux de ruissellement de la plateforme (dévers 4 %).

Géotextile antiérosif (200 g/m²) sur talus dans les zones exposées aux vents dominants (PK 418+000–421+500).

XI.4.3. Profil type en zone de déblai

En zone de déblai (profil P659 – exemple à PK 425+825 – visible sur les coupes COVADIS fournies), le profil type présente une forme en tranchée avec les dispositions suivantes :

Tranchée ouverte dans le rocher ou les alluvions compactes, avec talus de 3H/1V en sol meuble (QS1–QS2) ou 1H/1V en rocher (QS3). Le profil P658 à PK 425+800 présente la section de déblai maximale : 449,3 m², correspondant à une hauteur de déblai très importante dans la zone rocheuse du Hoggar.

Fond de fouille réglé à l'arase de terrassement définie par le profil en long. Compactage de la surface au vibro-compacteur ($E_{v2} \geq 30$ MPa vérifié par essai de plaque).

Couche de forme GNT QS3 de 35 cm pour lissage et protection du fond de fouille, même en rocher (nécessaire pour régularité de l'assise).

Fossés longitudinaux trapézoïdaux ($b = 0,50$ m, $h = 0,50$ m) en pied des talus gauche et droit, avec contre-fossé en crête.

Drainage en fond de fouille si présence d'humidité saisonnière (zones des oueds BV44, BV47).

XI.4.4. Comparaison des profils type remblai et déblai

Tableau XI.2 – Comparaison des caractéristiques des profils type remblai et déblai

Élément	Zone Remblai	Zone Déblai
Type de profil	Profil trapézoïdal (corps de remblai)	Profil trapézoïdal (fouille en tranchée)

Élément	Zone Remblai	Zone Déblai
Plateforme	8,00 m (G 4,70 m + D 3,30 m)	8,00 m (G 4,70 m + D 3,30 m)
Pente des talus	3H / 2V (pente douce adaptée au sol meuble)	2H / 2V (rocher/grès) → 1H / 1V si QS3 dur
Fossés / drainage	Fossé pied de remblai (collecte ruissellement)	Fossé de pied de talus trapézoïdal (b=0,50m, h=0,50m)
Couche de forme	35 cm GNT QS3 (zones QS2) 50 cm GNT + géotextile (zones QS0/QS1)	35 cm GNT QS3 (rocher, lissage de fond de fouille)
Traitement spécial	Substitution 1,0 m (zones QS0 inondables) Enrochements pied de talus (zones oueds)	Banquette de décharge hte > 8 m Drainage cunette fond de fouille (zones humides)

XI.5. Calcul des cubatures de terrassement

Tableau XI.3 – Récapitulatif des volumes de matériaux de l'assise ferroviaire (COVADIS)

Matériau	Volume (m³)	% du total	Usage
Ballast (25/50 mm, NF EN 13450)	48043	24.54 %	Couche de roulement – contact traverse
GNT (Grave naturelle traitée 0/31,5 mm)	42496.4	21.72 %	Sous-ballast
GNT 0/20 (Grave sableuse concassée)	36399.8	18.60 %	Couche de fondation
GNT 0/31,5 (Couche de forme QS3)	68839.4	35.17 %	Couche de forme / amélioration plateforme
TOTAL MATÉRIAUX	195778.6	100 %	Assise ferroviaire complète

Ces volumes représentent les quantités nettes de matériaux nécessaires à la mise en œuvre de la structure de voie sur l'ensemble de la Section 04 (PK 410+500 – PK 427+329). Le poste dominant est la couche de forme GNT 0/31,5 mm (42 985,3 m³ – 32,4 % du total), reflétant l'importance de l'amélioration de la plateforme sur ce tracé à dominante de sols QS1–QS2. Le ballast représente 34 226,7 m³, cohérent avec une épaisseur de 35 cm imposée par Vmax = 220 km/h sur 16,8 km de voie unique.

XI.6. Analyse du bilan Déblai / Remblai

XI.6.1. Synthèse des volumes

Tableau XI.4 – Bilan général Déblai/Remblai de la Section 04

Paramètre	Déblai	Remblai
Volume total cumulé (m ³)	238510	784558
Nombre de profils concernés	153 profils (21,1 %)	615 profils (84,8 %)
Surface maximale de section (m ²)	449,3 m ² — P658 / PK 425+800	331,21 m ² — P704 / PK 426+875
Zones principales	PK 410+900–411+025 PK 425+750–425+850 (déblai majeur)	PK 410+500–410+900 PK 411+050–427+330 (majorité du tracé)
Rapport Remblai / Déblai	R/D = 3.30 → fort déficit en déblai	Apport en matériaux d'emprunt requis

XI.6.2. Interprétation du bilan

Le bilan des cubatures fait apparaître un déséquilibre très important entre les volumes de remblai (784558m³) et les volumes de déblai (238510m³). Le rapport R/D = 3.30 indique que les déblais disponibles ne couvrent que 30.4 % des besoins en matériaux de remblai. Ce déséquilibre s'explique par plusieurs facteurs géomorphologiques propres au tracé :

Topographie du Hoggar : le tracé longe des piedmonts et franchit de larges plaines alluviales (vallées des oueds BV44, BV47, BV54) dont le fond est situé nettement en dessous du profil en long de la ligne. Les remblais de franchissement de ces dépressions génèrent des volumes très importants, visibles sur les profils P651 à P725 (PK 425+500–427+330) où les surfaces de remblai atteignent 174–331 m².

Relief peu accidenté : la Section 04 traverse principalement des zones plates ou faiblement ondulées (pénéplaine saharienne) ne générant que peu de déblais importants. Les zones de déblai significatif se limitent à la tranchée rocheuse de PK 425+750–425+850 (P658, 449,3 m²) et à quelques buttes mineures en début de section.

Alignement quasi-horizontal du profil en long : la faible pente longitudinale de la section limite les déblais de plateaux tout en imposant des remblais de compensation dans les bas-fonds.

XI.6.3. Besoins en matériaux d'apport

Pour combler le déficit en matériaux de remblai, les sources d'approvisionnement suivantes sont identifiées :

Gîtes d'emprunt de sable grossier alluvionnaire : identifiés lors de l'étude géotechnique dans les terrasses alluviales des oueds de la région (classement QS2 – grave sablo-graveleuse compacte). Volume mobilisable estimé > 500 000 m³ dans un rayon de 15 km.

Matériaux de déblai réutilisables des sections adjacentes (Sections 01–03 et 05–06) : dans le cadre d'un bilan global de mouvement de terres optimisé à l'échelle du projet complet, des volumes de déblai rocheux de qualité QS3 peuvent être valorisés comme matériaux de remblai haut de corps (couche de forme), réduisant les besoins en approvisionnement externe.

Matériaux de carrière (grès quartzitique Hoggar) : les déchets de taille de la carrière fournissant le ballast peuvent constituer une source de matériaux calibrés pour la couche de forme.

Le recours à des matériaux d'apport extérieurs implique la réalisation de pistes de chantier adaptées au gabarit des camions de transport (20 t de charge utile), la mise en place de points de chargement et de déchargement, et un suivi topographique permanent des épaisseurs de mise en œuvre.

XI.6.4. Mouvement des terres – Zones caractéristiques

L'analyse du listing COVADIS permet d'identifier les zones caractéristiques de mouvement de terres suivantes :

PK 410+500 – 410+900 (P01–P19) : zone de remblai progressif (surface 9–23 m²). Volume cumulé remblai : 6 875,5 m³. Aucun déblai. Corps de remblai de faible hauteur (1,5–3,0 m) sur terrain alluvial plat (QS2).

PK 410+900 – 411+025 (P20–P25) : zone de déblai (surfaces 6–38 m²). Volume partiel déblai : 3 045,8 m³. Transition terrain légèrement accidenté. Réutilisation directe des matériaux de déblai QS2 pour remblai des sections adjacentes.

PK 411+347 – 411+400 (P39–P42) : zone mixte (déblai + remblai simultanés). Profils mixtes liés à une configuration asymétrique du terrain naturel (dévers transversal du TN).

PK 425+050 – 425+850 (P631–P658) : zone de déblai majeur dans le rocher gréseux. Surface maximale 449,3 m² (P658). Volume estimé sur ce tronçon : ~35 000 m³. Les matériaux rocheux QS3 extraits sont valorisés en ballast (après concassage) et couche de forme.

PK 425+900 – 427+330 (P660–P725) : zone de remblai très important (surfaces 100–331 m²). Volume partiel : ~340 000 m³. Franchissement des dépressions et oueds BV47/BV54. Nécessite un apport massif de matériaux d'emprunt. Compactage par couches de 30 cm à 95 % OPN, contrôlé par essais à la plaque ($Ev2/Ev1 \leq 2,2$).

XI.7. Recommandations pour l'exécution des terrassements

XI.7.1. Compactage des remblais

Le compactage des remblais est exécuté par couches successives de 30 cm (épaisseur après compactage), à l'aide d'un compacteur vibrant à pieds dameurs (engins de type CAT CP56 ou équivalent) pour les matériaux fins, et rouleau vibrant lisse pour les graves. Les exigences de compactage sont :

Corps de remblai courant : ≥ 95 % de l'Optimum Proctor Normal (OPN) – essai NF P 94-093 ;

Partie supérieure des terrassements (PST – 1,0 m supérieur) : ≥ 97 % OPN + $Ev2 \geq 30$ MPa et rapport $K = Ev2/Ev1 \leq 2,2$ (essai de plaque NF P 94-117-1) ;

Zones QS0 remplacées par substitution : ≥ 98 % OPN + $Ev2 \geq 40$ MPa après traitement.

XI.7.2. Sécurité des talus

La stabilité des talus en cours de chantier doit être vérifiée lors de chaque phase d'exécution. Les dispositions suivantes sont imposées :

Éviter les remblais en eau : mise en place de drains provisoires pendant la construction dans les zones de fond d'oued (BV44, BV47, BV54) afin de dévier les ruissellements saisonniers ;

Ne pas surcharger le pied des talus en déblai avec des matériaux excavés ; maintenir une bande de sécurité de 2 m minimum en crête ;

Procéder au purgement des zones altérées en surface du fond de fouille avant mise en place des couches d'assise, avec contrôle par pénétromètre dynamique léger (Panda).

XI.7.3. Protection contre l'ensablement

Dans la zone éolienne (PK 418+000–421+500), les dispositions préventives suivantes sont mises en œuvre dès la phase de terrassement :

Compactage de la surface des talus de remblai et application d'un enduit de protection à base de liant bitumineux résiduel (émulsion 65 %) pour réduire la déflation éolienne ;

Pose de palissades provisoires en roseau ou géotextile tressé ($h = 1,50$ m) à 10 m de l'axe de la voie pendant la phase de construction ;

Éviter les opérations de terrassement par vent fort ($v > 10$ m/s) afin de limiter la dispersion des matériaux fins.

XI.8. Conclusion

Le présent chapitre a défini le profil en travers type retenu pour la Section 04 de la ligne ferroviaire Aïn Sâlah – Tamanrasset (PK 410+500 – PK 427+329). Ce profil de voie unique mixte ($V_{\max} = 220$ km/h, $V_{\min} = 100$ km/h) est conçu pour une plateforme de 8,00 m de largeur (asymétrique 4,70 m + 3,30 m), avec une assise ferroviaire de 0,73 m d'épaisseur totale conforme à l'UIC 719R, des talus à inclinaison 3H/2V, et un système de drainage transversal complet adapté aux conditions sahariennes.

Les cubatures de terrassement, calculées par le logiciel COVADIS 16.0d sur 725 profils, aboutissent aux résultats suivants :

Volume total de déblai : 238510 m³ (153 profils actifs, surface max 449,3 m² au PK 425+800) ;

Volume total de remblai : 784558 m³ (615 profils actifs, surface max 331,21 m² au PK 426+875)

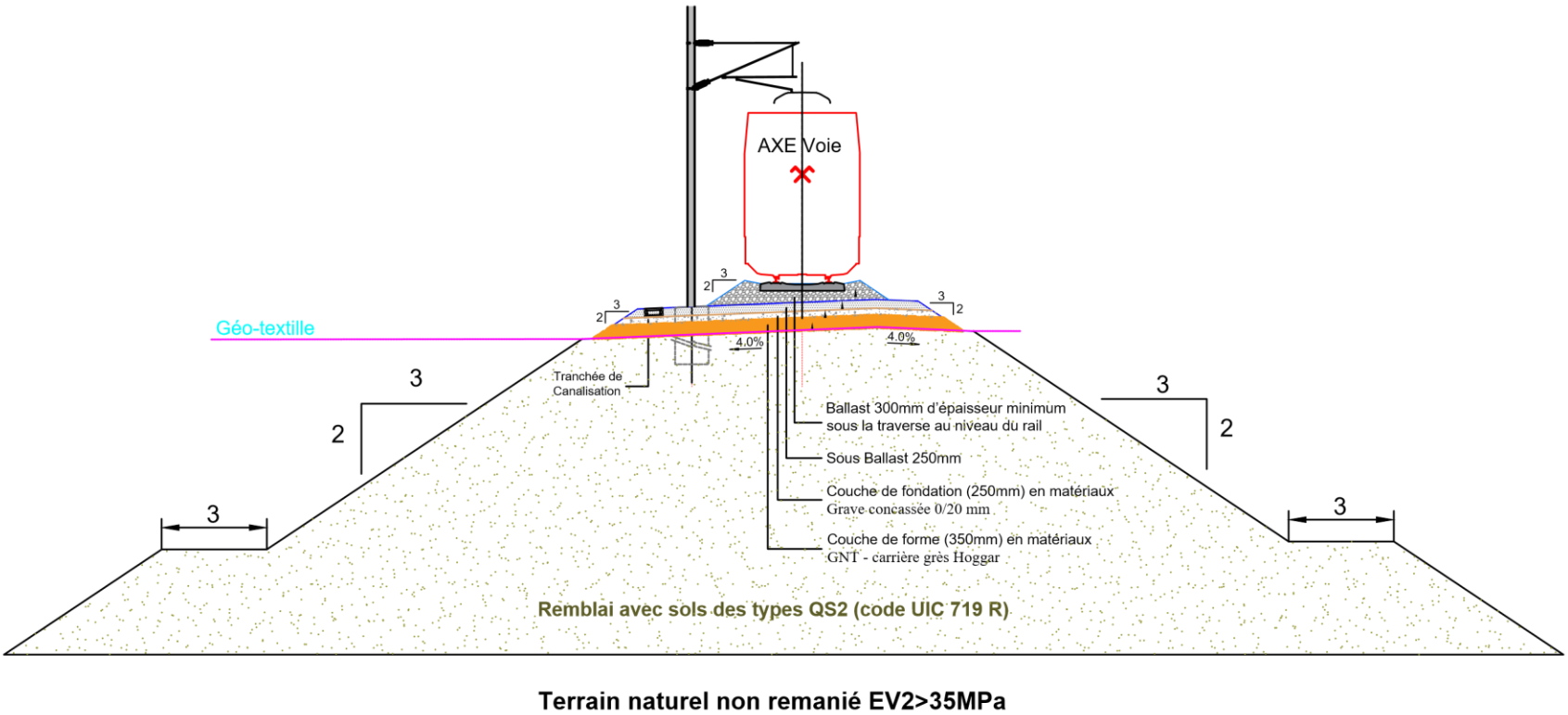
Volume total de matériaux d'assise : 195778.6 m³ (ballast : 48043 m³ ; GNT sous-ballast : 42496.4 m³ ; GNT 0/20 fondation : 36399.8 m³ ; GNT 0/31,5 forme : 68839.4 m³).

Le rapport déséquilibré R/D = 3,30 impose un recours massif à des matériaux d'apport extérieurs (gîtes alluviaux et carrière Hoggar), estimé à plus de 771 000 m³. Les terrassements seront exécutés par couches compactées à 95–97 % OPN, avec contrôle systématique à la plaque pour la partie supérieure des terrassement

PROFIL EN TRAVERS TYPE ZONE COURANTE

Echelle: 1/200

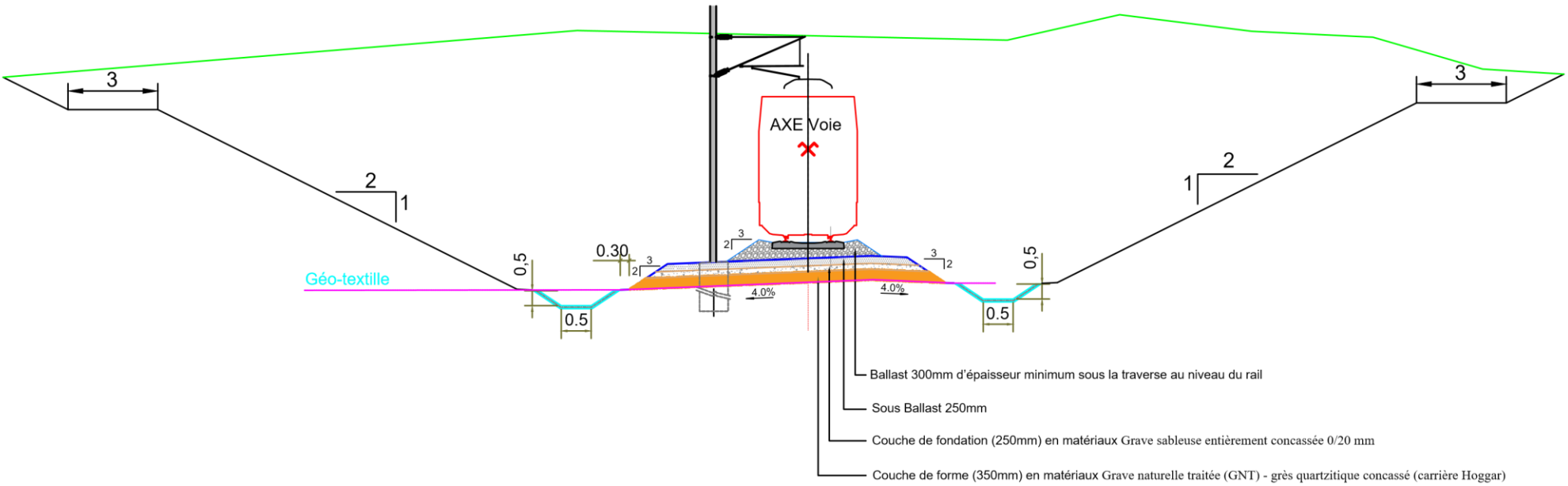
Remblai>6m



PROFIL EN TRAVERS TYPE ZONE COURANTE

Echelle: 1/200

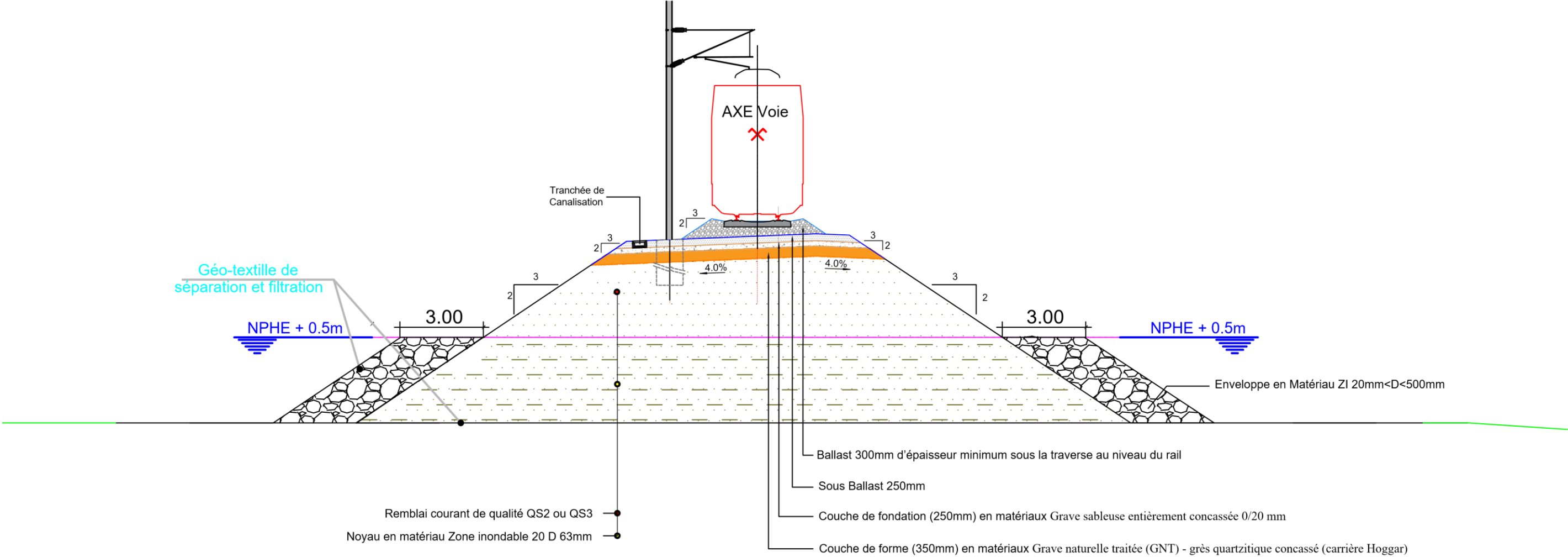
Deblai >6m



PROFIL EN TRAVERS TYPE

Echelle: 1/150

Remblai en zone inondable



CHAPITRE XII : CONCEPTION DE LA GARE de Molaye Lahcen

CHAPITRE XII : CONCEPTION DE LA GARE de Molaye Lahcen

XII.1. Introduction

Dans un projet ferroviaire, la gare est un lieu public animé où les voies se croisent et où les voyageurs convergent. C'est un point de connexion essentiel où les départs et les arrivées se rencontrent, donnant vie à un réseau de déplacements dynamique et fluide.

Dans ce chapitre, nous aborderons de manière approfondie la conception de la gare ferroviaire de Molaye Lahcen, implantée au PK 418+200 en section courante de la ligne, en zone de déblai dans les formations gréseuses du Hoggar. Nous examinerons méticuleusement chaque étape du processus de conception, depuis le type de gare jusqu'à la signalisation, en passant par le plan de masse, les appareils de voie, les quais, l'assainissement et le profil en travers.

XII.2. Type de gare

Il existe plusieurs catégories de gares ferroviaires :

- Gare voyageurs : accueil et desserte des passagers ;
- Gare marchandises : dédiée au trafic fret avec voies de garage et zones de chargement/déchargement ;
- Gare mixte : combinant les fonctions voyageurs et fret ;
- Gare de croisement et de dépassement (GCD) : implantée en section courante d'une ligne à voie unique pour permettre le croisement de trains en sens opposés ou le dépassement d'un convoi par un autre.

Les villes et villages le long du tracé sont raccordés à la nouvelle ligne par des gares voyageurs ou marchandises. Mais entre ces gares, d'autres possibilités de croisement des trains sont exigées par les conditions d'exploitation. Il est alors nécessaire de réaliser des gares de croisement et de garage (GCG), ce qui est le cas dans notre projet.

La gare de Molaye Lahcen est conçue comme une gare de croisement et de dépassement (GCD) à vocation mixte, constituée de quatre voies (V1, V2, V3, V4) et deux quais voyageurs (Q1 et Q2).

XII.3. Le plan de masse de la gare

Le concepteur de la gare est chargé d'établir un plan de masse intégrant toutes les installations essentielles en tenant compte de trois éléments techniques fondamentaux :

- Catégories de voies : elles sont importantes dans la détermination des fonctions spécifiques de chaque voie de la gare et des infrastructures associées ;
- Trafic ferroviaire : l'analyse du volume et de la nature du trafic est primordiale pour évaluer l'importance de la gare et dimensionner correctement les installations ;
- Emplacement géographique : la localisation de la gare influence directement le type de trafic attendu et les catégories de voies requises.

La prise en compte minutieuse de ces éléments techniques est essentielle pour élaborer un plan de masse précis et adapté, garantissant la fonctionnalité et l'efficacité opérationnelle de la gare.

XII.3.1. Conditions de conception de la gare de croisement

La conception de la gare de Molaye Lahcen est influencée par les aspects essentiels suivants :

- Le plan de la gare est élaboré en tenant compte des conditions géologiques locales (déblai dans les grès quartzitiques du Hoggar, QS3), de l'accessibilité aux voies de circulation existantes et des projets d'aménagement à venir ;
- La gare est implantée au PK 418+200, en section courante de la ligne, dans une zone de terrain favorable (déblai stable, sol rocheux) ;
- La déclivité en gare est maintenue à 0 ‰ pour prévenir tout déplacement non désiré des convois stationnés.

XII.3.2. Disposition transversale – voies et quais

La disposition transversale des voies et des quais dans le plan de masse est organisée comme suit, de la gauche vers la droite :

Tableau XII.1 : Caractéristiques dimensionnelles et fonctionnelles de la disposition transversale des voies et quais en gare

Position (gauche → droite)	Élément	Dimensions	Rôle
1	Quai Q1	L = 225 m l = 6 m h = 0.55 m	Quai latéral – accolé au bâtiment voyageurs (BV) – desserte voyageurs V1
2	Voie V1	L = 1320 m	Voie principale 1 (sens montant)
3	Voie V2	L = 1145 m	Voie principale 2 (croisement / dépassement)
4	Quai Q2	L = 225 m l = 8 m h = 0.55 m	Quai intermédiaire – desserte voyageurs V2 et V3
5	Voie V3	L = 1265 m	Voie de service – évitement voyageurs (accès quai Q2)
6	Voie V4	L = 700 m	Voie de dégagement — destinée à l'immobilisation temporaire des trains en panne ou en attente de secours (sans accès quai)

Le bâtiment voyageurs (BV) est implanté à l'extrémité gauche du plan de masse, directement accolé au quai Q1. Q1 (l=6m) dessert V1 et V2 (voies principales) depuis le côté bâtiment. Q2 (l=8m) est positionné entre V2 et V3 : quai intermédiaire de plus grande largeur permettant la desserte de V2 et V3.

XII.3.3. Caractéristiques générales de la gare

Tableau XII.2 – Caractéristiques générales de la Gare Molaye Lahcen

Paramètre	Valeur / Description
Localisation	PK 418+200 – en section courante de la ligne
Type de gare	Gare de croisement et de dépassement (GCD) – trafic mixte
Situation en travers	Zone en déblai – talus 2H/1V – grès quartzitique du Hoggar (QS3)
Nombre de voies	4 voies : V1, V2 (voies principales) + V3, V4 (voies de service)
Nombre de quais	2 quais : Q1 (côté V1, l=8m) et Q2 (entre V2 et V3, l=6m)
Longueur totale de la gare	1320 m (longueur de la voie V1 – voie la plus longue)
Déclivité en gare	10 ‰ et admissible
Type d'appareil de voie	UIC 60E1 – R500 – 1:12 / R300 (raccordement courbe en entrée)
Longueur ADV R500	102.37 m
Longueur ADV R300 (entrée)	29.78 m et 20.80 m (raccordements gauche/droite)
Longueurs intermédiaires ADV	16.62 m et 21.42 m
Garage franc GF	$GF = 3.57 \times 12 + 1 = 43.84 \text{ m}$ (ADV 1:12)
Nombre de GF	8 garages francs répartis dans la gare
Système de signalisation	BAL (Bloc Automatique Lumineux) + ERTMS Niveau 2 (GSM-R)

XII.4. Caractéristiques de la gare de croisement

XII.4.1. Déclivité

À la gare, la déclivité est contrôlée en fonction des activités qui s'y déroulent. Dans notre projet, nous avons maintenu une pente de 0 ‰ pour prévenir tout déplacement non désiré des trains.

Cette déclivité nulle est obligatoire dans toute l'emprise de la gare (entre les GF extérieurs) et assure :

- La sécurité du stationnement des convois sur les voies de service V3 et V4 ;
- La stabilité des manœuvres de composition et de décomposition des trains ;
- Le calage correct de l'assise ferroviaire sans risque de tassement différentiel.

La transition entre la pente de la ligne courante et le palier de la gare est assurée par des courbes de raccordement vertical conformes à la fiche UIC 703.

XII.4.2. Appareils de voie (ADV)

L'exploitation des voies ferrées requiert des dispositifs permettant de relier et d'interconnecter les itinéraires : les appareils de voie (ADV). Un appareil de voie est un dispositif de guidage facilitant le passage d'une voie à une autre tout en garantissant la continuité des voies. Typiquement, un appareil de voie se compose de trois parties essentielles :

- L'aiguillage : partie mobile constituée de lames d'aiguille permettant d'orienter les essieux vers la voie directe ou la voie déviée ;
- La partie intermédiaire : zone de convergence progressive des deux files de rails ;
- La partie centrale – le croisement : zone d'intersection des deux files de rails équipée d'un cœur de croisement en acier mangané.

Les appareils de voie incluent :

- Les branchements simples (BS) ;
- Les traversées ;
- Les traversées jonctions simples (T.J.S) et les traversées jonctions doubles (T.J.D).

Tableau XII.3 – Appareils de voie utilisés dans la gare Molaye Lhecen

Type ADV	Rayon (m)	Longueur (m)	Tangente	Vit. en déviation	Utilisation
UIC 60E1 – R500 – 1:12	500	43.594	0.083	60 km/h	Branchements intérieurs de la gare
UIC 60E1 – R300 – 1:9	300	16.155	0.111	40 km/h	Raccordement courbe en entrée/sortie de gare

Pour notre gare, deux types d'ADV sont utilisés : le R500 – 1:12 pour tous les branchements intérieurs, et le R300 pour les raccordements courbes en entrée/sortie de gare (longueurs 29.78 m et 20.80 m). Les longueurs intermédiaires entre ADV sont de 16.62 m et 21.42 m.

XII.4.3. Garage franc

Le garage franc désigne une portion de voie où un train peut être stationné sans empiéter sur les gabarits de sécurité et sans obstruer le passage des autres trains sur les voies adjacentes. Le garage franc est essentiel pour permettre des manœuvres sécurisées, le stationnement temporaire des trains et maintenir la fluidité du trafic ferroviaire.

La distance de garage franc, notée GF (en mètres), est définie par la formule réglementaire :

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

Avec :

- $n = 1 / \tan \alpha$: paramètre de l'appareil de voie (pour un ADV 1:12 $\rightarrow n = 12$) ;
- 3.57 : coefficient géométrique lié à l'entraxe normalisé des voies ;
- 1 m : marge de sécurité supplémentaire.

Application numérique pour l'ADV R500 – 1:12 :

$$GF = 3.57 \times 12 + 1 = 42.84 + 1 = 43.84 \text{ m}$$

La gare de Molaye Lahcen comporte huit (08) garages francs répartis aux nœuds de branchement de chaque ADV, matérialisés sur le plan de masse par les repères « GF » (voir Planche n° GML-01 : Tracé en plan Gare Molaye Lahcen – Échelle 1/3500).

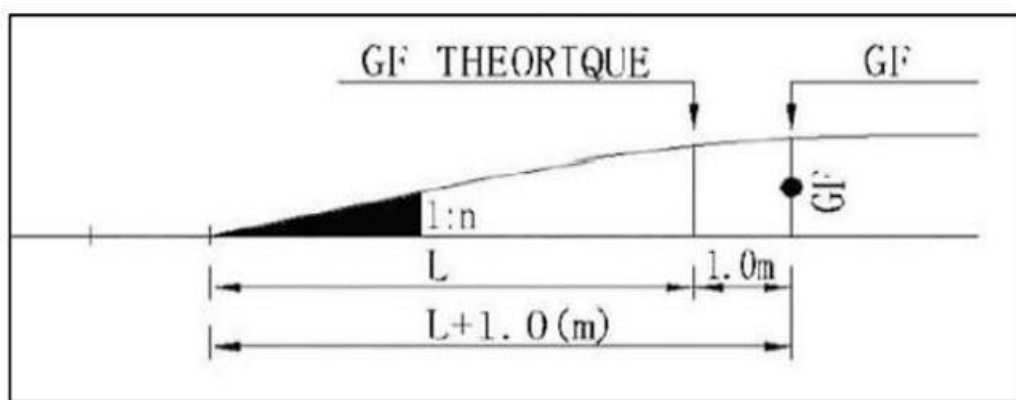


Figure XII-1 garage franc.

XII.4.4. La longueur utile

La longueur utile de stationnement des trains désigne la portion de voie ferrée disponible et sécurisée pour accueillir un train complet (locomotives + wagons) sans empiéter sur les voies adjacentes ni entraver le passage des autres trains. Cette longueur doit être suffisante pour permettre le stationnement, le croisement ou le dépassement des trains en toute sécurité.

Selon les prescriptions de la SNTF, la longueur utile minimale est de :

- 426 m pour les trains voyageurs ;
- 870 m pour les trains de marchandises (voies principales et voies de service).

Tableau XII.4 – Longueurs caractéristiques de la Gare Molaye Lahcen

Voie	Longueur (m)	Catégorie	Rôle	Min. SNTF
V1	1320	Voie principale	Circulation normale sens montant	870 m (fret) ✓
V2	1145	Voie principale	Croisement et dépassement	870 m (fret) ✓
V3	1265	Voie de service	Évitement – trains voyageurs / rames légères (accès quai Q2)	426 m (voy.) ✓
V4	700	Voie de dégagement	destinée à l'immobilisation temporaire des trains en panne ou en attente de secours (sans accès quai)	----

Toutes les longueurs sont mesurées entre les garages francs (GF) délimitant les zones de stationnement sécurisé. Toutes les voies respectent les longueurs utiles minimales SNTF.

XII.4.5. Les heurtoirs

Les heurtoirs, également connus sous le nom de butoirs ou tampons de voie, sont des dispositifs de sécurité placés aux extrémités des voies ferrées. Leur rôle est de stopper les trains et les wagons qui dépasseraient la limite de la voie, en absorbant l'énergie de l'impact pour immobiliser le matériel roulant.

Ces équipements sont essentiels pour éviter les déraillements et protéger les infrastructures ferroviaires. Dans la gare de Molaye Lahcen, des heurtoirs élastiques à ressorts (type standard SNTF) sont placés :

- En extrémité de la voie V4 (voie de service longue – côté terminus) ;
- En extrémité de la voie V3 (voie de service courte – côté terminus).

XII.5. Les voies de la gare

XII.5.1. Voies principales (V1 et V2)

Les voies principales V1 et V2 assurent la circulation normale des trains et permettent le croisement simultané de deux convois en sens opposés. Elles sont directement contiguës (entraxe 4.20 m), encadrées par le quai Q1 côté bâtiment voyageurs et par le quai Q2 côté voies de service.

- V1 (1320 m) : voie principale sens montant, directement desservie par le quai Q1 côté bâtiment – la plus longue de la gare, dimensionnée pour les convois fret les plus longs de la ligne (> 870 m) ;
- V2 (1145 m) : voie principale sens descendant / croisement – longueur supérieure au minimum SNTF de 870 m, desservie par le quai Q2 sur sa face droite.

XII.5.2. Voies de service (V3 et V4)

Les voies de service V3 et V4 sont destinées au garage des convois, aux manœuvres et à l'entretien du matériel roulant.

- V3 (1265 m) : voie d'évitement, destinée au garage temporaire de trains voyageurs ou de rames légères. Elle longe le quai Q2 sur sa face gauche ;
- V4 (700 m) : voie de garage fret, implantée en extrémité de gare (sans accès quai).

XII.6. Les quais

XII.6.1. Généralités

La gare de Molaye Lahcen est équipée de deux quais latéraux (Q1 et Q2) permettant l'embarquement et le débarquement des voyageurs. Les quais sont conçus conformément aux normes SNTF et aux prescriptions de la fiche UIC 741. Leur longueur (225 m) est adaptée au trafic voyageur régional prévu sur la ligne.

XII.6.2. Caractéristiques des quais

Tableau XII.5 – Caractéristiques des quais Q1 et Q2

Caractéristique	Quai Q1	Quai Q2
Position dans le plan	Côté gauche – accolé au bâtiment voyageurs, avant V1	Entre V2 et V3
Longueur (m)	225	225
Largeur (m)	6	8
Hauteur / plan de roulement (m)	0.55	0.55
Voie(s) desservie(s)	V1	V2 (face droite) et V3 (face gauche)
Structure	Dalle BA (e=15cm) sur remblai compacté	Dalle BA (e=15cm) sur remblai compacté
Assainissement	Caniveau longitudinal pente $\geq 4 \text{ ‰}$	Caniveau longitudinal pente $\geq 4 \text{ ‰}$
Accès	Rampes PMR + escaliers aux 2 extrémités	Rampes PMR + escaliers aux 2 extrémités

XII.6.3. Équipements des quais

Chaque quai sera équipé des aménagements suivants :

- Dalle béton armé (épaisseur 15 cm, béton C25/30) sur remblai compacté ;
- Bordures de quai bétonnées, hauteur 0.55 m / plan de roulement ;
- Marquage au sol des zones d'arrêt et repères de position des portes ;
- Caniveaux d'assainissement longitudinaux (pente $\geq 4\text{‰}$) raccordés aux fossés de déblai ;
- Abris voyageurs légers adaptés au contexte saharien (protection solaire et anti-sable) ;
- Éclairage public par panneaux solaires (autonomie en milieu saharien isolé) ;
- Rampes d'accès PMR (Personnes à Mobilité Réduite) aux deux extrémités de chaque quai
- Signalétique d'information voyageurs (numéros de voie, destinations, consignes de sécurité).

XII.7. Profil en travers type de la gare en déblai

XII.7.1. Contexte de la zone en déblai

La gare de Molaye Lahcen est implantée au PK 418+200 en zone de déblai dans les formations gréseuses et quartzitiques du massif du Hoggar (classe géotechnique QS3 – rocher). Ce contexte favorable présente plusieurs avantages pour la conception du profil en travers :

- Absence de risque de tassement différentiel grâce à la rigidité du substratum rocheux ;
- Portance élevée du sol (QS3) permettant une plateforme de classe P3 ;
- Talus de déblai stables en pente 2H/1V dans les formations gréseuses ($FS \geq 1.65$ selon calcul GEO5 – cf. chapitre Géotechnique).

XII.7.2. Description du profil en travers

Le profil en travers type de la gare est organisé comme suit, de la gauche vers la droite :

- Talus de déblai gauche – pente 2H/1V (0.5 horizontal pour 1 vertical) – rocher grès quartzitique ;
- Fossé de déblai gauche bétonné trapézoïdal – pente longitudinale $\geq 4\text{‰}$;
- Bâtiment voyageurs (BV) ;
- Quai Q1 ($l = 6\text{ m}$, $h = 0.55\text{ m}$) – dalle BA sur remblai compacté – accolé au bâtiment, avant V1 ;
- Axe Voie V1 – entraxe 4.20 m + 1.65 m ;
- Axe Voie V2 – entraxe 1.65 m + 4.20 m + 1.65 m ;
- Quai Q2 ($l = 8\text{ m}$, $h = 0.55\text{ m}$) – quai intermédiaire entre V2 et V3 ;
- Axe Voie V3 (évitement voyageurs, accès Q2) et Axe Voie V4 (garage fret, sans quai) – voies de service ;
- Buse Ø250 – drainage transversal sous la plateforme (deux buses, une par côté) ;
- Fossé de déblai droit bétonné trapézoïdal – pente longitudinale $\geq 4\text{‰}$;
- Talus de déblai droit – pente 2H/1V – rocher grès quartzitique.

La pente transversale de la plateforme est de 0.30 m/1 m (1H/0.30V), assurant l'écoulement des eaux de surface vers les fossés latéraux.

Tableau XII.6 – Description transversale du profil en travers de la gare

Élément du profil	Côté gauche	Centre	Côté droit
Talus de déblai	Pente 2H/1V – grès quartzitique	—	Pente 2H/1V – grès quartzitique
Fossé de déblai	Bétonné trapézoïdal – pente $\geq 4\%$	—	Bétonné trapézoïdal – pente $\geq 4\%$
Quai latéral	Q1 : l=6m, h=0.55m (accolé au bâtiment, avant V1)	—	—
Voies	Axe V1 (4.20m) – Axe V2 (1.65m)	—	Axe V3 (4.20m) – Axe V4 (1.65m)
Quai intermédiaire	—	Q2 : l=8m, h=0.55m (entre V2 et V3)	—
Assainissement sous voie	Buse Ø250 (drainage transversal)	—	Buse Ø250 (drainage transversal)
Pente de plateforme	1H/0.30V (pente transversale)	—	1H/0.30V (pente transversale)

XII.7.3. Structure de l'assise ferroviaire

La structure d'assise ferroviaire indiquée sur le Profil type Gare Moulay Lahcen est la suivante :

Tableau XII.7 – Structure de l'assise ferroviaire en gare

Couche	Épaisseur	Matériau
(a) Rail	—	Rail UIC 60 (60 kg/ml)
(b) Traverse bibloc	—	Traverse monobloc béton L = 2.24 m
(c) Ballast	300 mm min. sous traverse au niveau du rail	Grave concassée 25/50 mm – LA $\leq 19\%$

Couche	Épaisseur	Matériau
(d) Sous-ballast	250 mm	Grave propre 0/31.5 mm
(e) Couche de fondation	250 mm	Grave sableuse entièrement concassée 0/20 mm
(f) Couche de forme	350 mm	GNT – Grès quartzitique concassé (carrière Hoggar)
(g) Terrain naturel	—	Rocher / grès quartzitique QS3 – déblai
TOTAL assise	800mm	Conforme UIC 719R – Plateforme P3 (sol QS3 rocheux)

La couche de forme en grès quartzitique concassé provenant des carrières du Hoggar constitue un matériau local de haute qualité (QS3) parfaitement adapté au contexte saharien. Son utilisation réduit les coûts de transport des matériaux.

XII.8. L'assainissement longitudinal de la gare

Pour drainer les eaux de ruissellement qui pénètrent dans le ballast et la plateforme, des canaux sont installés longitudinalement avec une pente de 4 ‰. Ces canaux assurent l'évacuation de ces eaux vers le système d'assainissement via des regards d'inspection.

Dans le cas spécifique de la gare de Molaye Lahcen en zone de déblai, l'assainissement est assuré par :

- Fossés longitudinaux bétonnés trapézoïdaux en pied de talus de déblai (gauche et droit), pente ≥ 4 ‰ ;
- Buses transversales Ø250 sous la plateforme (comme indiqué sur le profil en travers) pour le drainage perpendiculaire à la voie ;
- Regards d'inspection béton tous les 50 m pour le curage et la maintenance ;
- Caniveaux longitudinaux bétonnés sous les quais Q1 et Q2, raccordés aux fossés de déblai ;
- Évacuation finale vers l'exutoire naturel (oued latéral) via un ouvrage dimensionné au débit centennal ;
- Protection anti-ensablement : seuils de dégraissage à l'entrée de chaque buse transversale.

XII.9. Signalisation ferroviaire en gare

XII.9.1. Le rôle des installations de signalisation

Les installations de signalisation ferroviaire sont importantes et fonctionnent pour garantir la sécurité des opérations dans le transport ferroviaire ainsi que pour assurer un flux optimal. Ces installations permettent :

- Maîtriser le volume du trafic ferroviaire pour éviter les conflits et assurer une fluidité optimale ;

- Informer les conducteurs des dangers de la conduite sur voie ferrée et des moyens de réduire les risques d'accidents et de déraillements ;
- Réguler la circulation dans les deux sens sur la ligne à voie unique ;
- Indiquer la sécurité de toutes les personnes impliquées : passagers, personnel et marchandises ;
- Contribuer à améliorer la communication entre les trains et le centre de contrôle.

XII.9.2. Les signaux ferroviaires en gare

Tableau XII.8 – Signaux ferroviaires implantés en gare Molaye Lahcen

Signal	Signification	Position en gare
Feu vert	Marche normale autorisée – voie libre	Sortie de gare (les deux sens)
Feu vert clignotant	Réduire la vitesse (trains > 160 km/h)	Approche de gare haute vitesse
Avertissement (feu jaune)	Être en mesure de s'arrêter avant le signal d'arrêt suivant	~1000 m avant entrée gare (les 2 sens)
Feu jaune clignotant	S'arrêter avant le signal annoncé à distance réduite	Section intermédiaire d'approche
Ralentissement 30	Ne pas dépasser 30 km/h au franchissement de l'aiguillage	ADV R300 – entrée courbe serrée
Rappel 30	Confirmation du ralentissement 30 km/h	Après ADV R300
Ralentissement 60	Ne pas dépasser 60 km/h au franchissement de l'aiguillage	ADV R500 – branchements intérieurs
Rappel 60	Confirmation du ralentissement 60 km/h	Après chaque ADV R500
Carré (rouge fixe)	Arrêt absolu – interdit de franchissement	Entrée de gare (les deux côtés)
Sémaphore	Arrêt – franchissable après arrêt complet et accord	Entrée voies de service V3 et V4
Feu rouge clignotant	Avance en marche à vue – vitesse ≤ 15 km/h	Zones de manœuvre à visibilité réduite

Signal	Signification	Position en gare
Carré violet	Arrêt absolu – manœuvre uniquement	Extrémités V3 et V4 (côté heurtoirs)
Feu blanc	Marche en manœuvre autorisée	Zones de manœuvre intérieur gare

XII.9.3. Principe de base du cantonnement

Le canton est un tronçon ferroviaire qui constitue le socle du système d'espacement des trains, permettant d'éviter les rattrapages. La ligne de chemin de fer est divisée en différents cantons, chacun disposant d'un signallement. Le cantonnement est le mécanisme d'écartement des trains qui circulent dans le même sens sur une même voie.

Normalement, il n'y a qu'un seul train dans un canton donné. Lorsqu'un train traverse un canton, les composants environnementaux du train forment un court-circuit entre les deux voies du rail. En conséquence, le signal est fermé à l'entrée du canton et un feu rouge apparaît. Lorsque le train pénètre dans le canton suivant, le signal de protection s'ouvre à son passage.

Dans la gare de Molaye Lahcen, chaque voie (V1, V2, V3, V4) constitue un canton distinct, protégé à ses deux extrémités par des signaux d'entrée (carré ou sémaphore).

XII.9.4. Application sur notre projet – BAL + ERTMS Niveau 2

Dans le cadre de notre projet ferroviaire, nous avons opté pour l'utilisation du Bloc Automatique Lumineux (B.A.L.) dans notre gare de croisement, en association avec le système ERTMS Niveau 2 (GSM-R) :

- BAL (Bloc Automatique Lumineux) : grâce à ses signaux automatiques, il permet une gestion efficace des mouvements des trains, particulièrement les trains de marchandises qui constituent la majorité du trafic de la ligne. Chaque voie de la gare est protégée automatiquement en fonction de son état d'occupation ;
- ERTMS Niveau 2 / GSM-R : système de gestion du trafic ferroviaire européen visant à améliorer la sécurité et l'efficacité du transport ferroviaire. La transmission des informations de sécurité (autorisation de mouvement, vitesse cible) s'effectue numériquement via le réseau radio GSM-R entre le poste de commande centralisé et les cabines de conduite.

Cette combinaison BAL + ERTMS Niveau 2 garantit une coordination optimale des opérations, assurant une gestion fluide et sécurisée des mouvements des trains, tout en répondant aux normes les plus élevées en matière de sécurité et de performance ferroviaire.

XII.10. Conclusion

À la fin de ce chapitre, nous avons réussi la conception de notre gare de croisement de Molaye Lahcen, implantée au PK 418+200 en zone de déblai dans les grès quartzitiques du Hoggar. Les conclusions principales sont les suivantes :

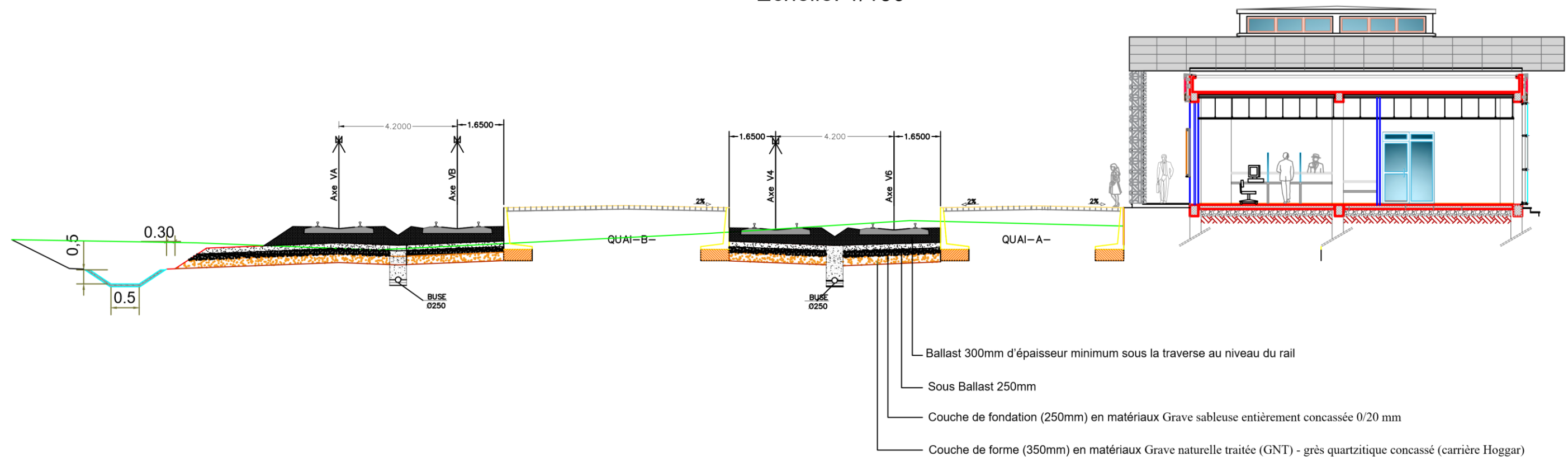
- La gare est de type GCD (Gare de Croisement et de Dépassement) à quatre voies, avec la disposition transversale suivante (gauche → droite) : BV → Q1 (6m) → V1 (1320m) → V2 (1145m) → Q2 (8m) → V3 (1265m) → V4 (700m) ;
- Toutes les voies respectent les longueurs utiles minimales SNTF : V1, V2 et V3 dépassent largement 870 m (fret), V4 dépasse 426 m (voyageurs) ;
- Deux quais latéraux de 225 m chacun sont prévus : Q1 (l=6m), accolé au bâtiment voyageurs, desservant V1 et V2, et Q2 (l=8m) entre V2 et V3, desservant V2 et V3 (voie d'évitement voyageurs) ; hauteur de 0.55 m / plan de roulement dans les deux cas ;
- Deux types d'ADV sont utilisés : R500 – 1:12 (102.37 m) pour les branchements intérieurs, et R300 (29.78 m / 20.80 m) pour les raccordements courbes en entrée/sortie ; avec un garage franc de 43.84 m et 8 GF répartis dans la gare ;
- La déclivité en gare est de 0 ‰, garantissant la sécurité du stationnement des convois ;
- Le profil en travers est en déblai (talus 2H/1V) dans les grès quartzitiques du Hoggar ; l'assise ferroviaire comprend : ballast 350mm + sous-ballast 250mm + fondation 200mm (grave concassée 0/20mm) + couche de forme 350mm (GNT – grès quartzitique carrière Hoggar) ;
- L'assainissement est assuré par fossés longitudinaux béton (pente ≥ 4 ‰) + buses transversales Ø250 + regards d'inspection tous les 50 m ;
- La signalisation BAL + ERTMS Niveau 2 (GSM-R) assure la sécurité et la fluidité de l'exploitation ferroviaire.

Cette conception garantit une gare performante, durable et adaptée aux conditions spécifiques de la zone saharienne du Hoggar, en assurant la sécurité, le confort et l'efficacité opérationnelle pour l'ensemble des usagers.

Echelle: 1/3500



Echelle: 1/150



CHAPITRE XIII : SIGNALISATION FERROVIAIRE

CHAPITRE XIII : SIGNALISATION FERROVIAIRE

XIII.1. Introduction:

Le tronçon ferroviaire PK 410+500 – PK 427+329, situé dans la wilaya de Tamanrasset et incluant la gare de Moulay Lahcen, est conçu pour une vitesse de projet de 220 km/h sur voie unique électrifiée. La signalisation ferroviaire constitue un élément fondamental pour la sécurité et l'efficacité de l'exploitation de cette ligne à grande vitesse dans un environnement saharien isolé.

Dans ce chapitre, nous présenterons les concepts de base de la signalisation ferroviaire, les différents types de signaux utilisés, les systèmes de cantonnement retenus et leur application spécifique au présent projet.

XIII.2. Rôle des installations de signalisation

Les installations de signalisation ferroviaire sont indispensables pour garantir la sécurité des opérations et assurer un flux de trafic optimal. Dans le contexte de notre projet, elles permettent notamment de :

- Maîtriser le volume du trafic ferroviaire sur voie unique pour éviter les conflits d'itinéraires et les rattrapages.
- Informer les conducteurs des dangers et des contraintes spécifiques au parcours (zones d'ensablement, ouvrages hydrauliques, passage à niveau).
- Réguler la circulation bidirectionnelle sur voie unique, notamment dans la zone de croisement de la gare de Moulay Lahcen.
- Garantir la sécurité de toutes les personnes impliquées — passagers, personnel et agents de maintenance.
- Assurer la communication entre les trains et le centre de contrôle centralisé de la ligne.

XIII.3. Les risques ferroviaires

La sécurité ferroviaire est une priorité absolue sur ce tronçon à grande vitesse. Les principaux risques identifiés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau XIII.1 : Matrice d'identification des risques ferroviaires, leurs causes et leurs conséquences potentielles

Risque	Configuration	Cause	Conséquence
Itinéraires non gérés (voie unique)	Nez à nez	Absence de cantonnement automatique	Collision frontale
Espacement non géré	Rattrapage	Canton trop court / signal ignoré	Collision arrière
Conflit d'itinéraire	Itinéraires sécants	Aiguillage mal positionné en gare	Déraillement

Risque	Configuration	Cause	Conséquence
Vitesse excessive	Déraillement	Non-respect des signaux de limitation	Accident grave
Protection insuffisante	Choc extérieur	Passage à niveau non sécurisé	Choc avec un tiers

XIII.4. Fonctions des signaux

Les signaux ferroviaires remplissent trois fonctions primordiales :

- La signalisation d'arrêt : commande l'arrêt complet du train avant le signal (Carré, Sémaphore, Carré Violet).
- La signalisation de limitation de vitesse : impose une vitesse réduite sur un tronçon ou à l'entrée d'un appareil de voie (Ralentissement 30, Ralentissement 60).
- La signalisation de direction : guide les conducteurs sur la voie à suivre lors de la traversée des aiguillages en gare de Moulay Lahcen.

Chaque fonction est associée à deux types de signaux : les signaux d'annonce (pré avertissement) positionnés en amont, et les signaux d'exécution placés à l'endroit précis de l'action.

XIII.5. Implantation longitudinale

Pour garantir que les mécaniciens réagissent correctement aux signaux à 220 km/h, les signaux d'avertissement doivent être positionnés à une distance suffisante en amont. Les facteurs déterminants sont :

- La distance d'arrêt : calculée en tenant compte du profil longitudinal (pentes et rampes) du tronçon PK 410+500 – PK 426+000, conformément à la fiche UIC 736.
- La distance de ralentissement : déterminée par la vitesse de 220 km/h et les capacités de freinage des rames en service sur la ligne.

Pour une ligne conçue à $V_p = 220$ km/h, la distance de signalisation avancée est typiquement de l'ordre de 1 500 à 2 000 m, en cohérence avec les distances d'arrêt des trains à grande vitesse.

XIII.6. Les signaux ferroviaires du projet

Le tableau suivant présente la signalisation retenue pour le tronçon PK 410+500 – PK 427+329, en conformité avec les normes SNTF et les fiches UIC applicables :

Tableau XIII.2 : Synthèse de la signalisation ferroviaire retenue et signification des principaux feux du projet

Nom du signal	Signification
Feu vert	Marche normale autorisée à la vitesse maximale (220 km/h).

Nom du signal	Signification
Feu vert clignotant	Commande la réduction de vitesse pour les trains dépassant 160 km/h.
Feu blanc	Commande ou confirme la marche en manœuvre (zone de gare Moulay Lahcen).
Feu blanc clignotant	Interdit le départ en ligne depuis la gare.
Avertissement / Feu jaune	Commande au mécanicien d'être prêt à s'arrêter avant le signal d'arrêt annoncé.
Feu jaune clignotant	Préavertissement à distance réduite pour le signal annoncé suivant.
Ralentissement 30	Impose une vitesse ≤ 30 km/h au franchissement de l'aiguillage correspondant.
Ralentissement 60	Impose une vitesse ≤ 60 km/h au franchissement de l'aiguillage correspondant.
Carré (C)	Commande l'arrêt absolu avant le signal (itinéraire incompatible).
Sémaphore (S)	Commande l'arrêt avant le signal (espacement trains).
Feu rouge clignotant	Autorisation d'avancer en marche à vue à ≤ 15 km/h sans marquer l'arrêt.
Carré violet	Commande l'arrêt avant le signal (protection des voies de service).

XIII.7. Principe de base du cantonnement

Le cantonnement est le mécanisme fondamental d'espacement des trains circulant dans le même sens sur la voie unique du tronçon PK 410+500 – PK 427+329. La ligne est divisée en cantons successifs protégés par des signaux d'arrêt.

Un seul train peut occuper un canton à la fois. Lorsqu'un train pénètre dans un canton, son circuit de roue établit un court-circuit entre les deux rails, ce qui ferme automatiquement le signal d'entrée (feu rouge). Lorsque le train libère le canton, le signal se réouvre progressivement (jaune puis vert), permettant au train suivant d'avancer.

Sur le tronçon à voie unique de notre projet, le cantonnement joue un rôle encore plus critique : il gère non seulement l'espacement dans un même sens mais également les croisements à la gare de Moulay Lahcen.

XIII.8. Les types de blocs

Il existe plusieurs systèmes de gestion des signaux, adaptés à la fréquence du trafic :

- Block Manuel (B.M) : adapté aux lignes peu fréquentées, nécessite qu'un agent ouvre manuellement le signal de bloc pour autoriser l'accès à la voie suivante.
- Block Automatique à Permissivité Restreinte (B.A.P.R) : utilisé sur les lignes moyennement fréquentées, il gère automatiquement l'entrée des trains avec des signaux automatiques.
- Block Automatique Lumineux (B.A.L) : système principal pour les lignes à fort trafic, utilise des signaux lumineux automatiques pour gérer les trains en temps réel en fonction de leur position et des conditions de circulation.

XIII.9. Le système de signalisation moderne ERTMS

L'ERTMS (European Railway Traffic Management System) est le système européen de gestion du trafic ferroviaire visant à améliorer la sécurité et l'interopérabilité. Il se décline en trois niveaux :

- Niveau 1 : informations transmises aux trains via des balises ponctuelles (eurobalises) au sol, complétant la signalisation latérale.
- Niveau 2 : informations transmises en continu par radio (GSM-R), sans signalisation latérale obligatoire. Les ordres de mouvement sont affichés directement dans la cabine (DMI).
- Niveau 3 : niveau avancé avec espacement mobile des trains, sans occupation de canton fixe.

XIII.10. Application sur notre projet

Dans le cadre du tronçon ferroviaire PK 410+500 – PK 427+329, conçu pour une vitesse de 220 km/h sur voie unique électrifiée dans un milieu saharien, le système de signalisation retenu est la combinaison suivante :

- Bloc Automatique Lumineux (B.A.L) : déployé sur l'ensemble du tronçon pour garantir l'espacement automatique des trains et la gestion des croisements à la gare de Moulay Lahcen. Le B.A.L assure une gestion efficace et sécurisée des mouvements à grande vitesse.
- ERTMS Niveau 2 (GSM-R) : adopté en superposition au B.A.L pour disposer d'un contrôle continu de la vitesse et d'une supervision en temps réel depuis le Poste de Commandement Centralisé (PCC). Ce système est particulièrement adapté à l'environnement isolé du Grand Sud, où la radio GSM-R constitue le principal vecteur de communication.

En gare de Moulay Lahcen, les 8 appareils de voie (ADV) sont équipés de commandes électriques centralisées intégrées dans le Poste d'Aiguillage Informatisé (PAI) conforme aux prescriptions SNTF. Les signaux lumineux protégeant chaque itinéraire en gare (entrée-sortie V1, V2, V3, V4) sont commandés depuis le PAI et supervisés depuis le PCC.

XIII.11. Conclusion

Ce chapitre a permis de définir le système de signalisation adapté au tronçon PK 410+500 – PK 427+329. La combinaison B.A.L + ERTMS Niveau 2 (GSM-R) répond aux exigences d'une ligne à grande vitesse (220 km/h) à voie unique dans un environnement isolé, en garantissant :

- La sécurité absolue des croisements en gare de Moulay Lahcen sur voie unique.
- Le contrôle continu de la vitesse et la supervision en temps réel depuis le PCC.
- La fiabilité opérationnelle dans les conditions climatiques extrêmes du Sahara central (températures jusqu'à 45 °C, tempêtes de sable).
- La conformité aux normes SNTF et aux fiches UIC applicables aux lignes à grande vitesse.

La mise en œuvre de ce système de signalisation moderne constitue un prérequis indispensable à l'exploitation sécurisée et performante du tronçon dans le cadre de la pénétrante ferroviaire centre Aïn Salah – Tamanrasset.

CHAPITRE XIV : ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

CHAPITRE XIV : ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

XIV.1. Introduction :

Le projet ferroviaire du tronçon PK 410+500 – PK 427+329, situé dans la wilaya de Tamanrasset (Grand Sud algérien) et incluant la gare de Moulay Lahcen, représente un maillon essentiel de la pénétrante ferroviaire centre reliant Aïn Salah à Tamanrasset. Ce projet stratégique vise à désenclaver les wilayas du Grand Sud et à soutenir leur développement économique.

Cependant, toute infrastructure de cette envergure est susceptible de générer des impacts sur l'environnement naturel, humain et économique de la zone traversée. L'étude d'impact environnemental constitue un outil d'évaluation de la faisabilité du projet ; elle fournit une analyse détaillée des effets sur l'écosystème local et propose des mesures d'atténuation pour minimiser ces impacts, en veillant à ce que les pratiques de construction et d'exploitation respectent les normes environnementales en vigueur.

XIV.2. Cadre législatif et réglementaire

Le projet doit se conformer aux lois et règlements en vigueur en Algérie en matière de protection de l'environnement. Les principales dispositions légales applicables sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau XIV.1 : Synthèse du cadre législatif et réglementaire applicable en matière de protection de l'environnement en Algérie

Domaine	Références légales et réglementaires
Protection de l'environnement et développement durable	- Loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. - Loi n° 01-20 du 12 décembre 2001 relative à l'aménagement et au développement durable du territoire.
Étude d'impact sur l'environnement	- Décret exécutif n° 90-78 du 27 février 1990 relatif aux études d'impact sur l'environnement. - Décret exécutif n° 07-145 du 19 mai 2007 déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et notices d'impact sur l'environnement.
Faune et flore	- Ordonnance n° 06-05 du 15 juillet 2006 relative à la protection de certaines espèces animales menacées de disparition. - Décret exécutif n° 12-235 du 24 mai 2012 fixant la liste des espèces animales non domestiques protégées.
Patrimoine culturel et sites archéologiques	- Loi n° 98-04 du 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel.

XIV3 Description du site

Le tronçon PK 410+500 – PK 427+329 s'étend sur 16,8 km dans la wilaya de Tamanrasset, à proximité de la commune d'Aïn Salah, dans le Grand Sud algérien. La zone d'étude présente les caractéristiques suivantes:

- Topographie : relief globalement plat à légèrement ondulé, typique des regs sahariens du Hoggar, favorable à l'implantation d'une infrastructure linéaire.
- Milieu géologique : formations du massif du Hoggar avec des affleurements de grès quartzitiques à l'est du tracé, constituant la carrière de ballast du projet.
- Présence d'oueds : le tracé franchit plusieurs oueds (55 bassins versants recensés) pouvant générer des crues éclairs, en particulier les grands bassins BV44, BV45, BV47, BV51 et BV54.
- Zones d'ensablement : une zone de dunes éoliennes active est identifiée entre PK 418+000 et PK 421+500, constituant la principale contrainte environnementale du projet.
- Milieu humain : milieu peu peuplé, typique du désert saharien. La gare de Moulay Lahcen (PK 418+200) constitue le seul équipement structurant de la zone.

XIV4 Analyse de l'état initial de la zone du projet**XIV4.1 Situation géographique et administrative****Tableau XIV.2 : Synthèse de la situation géographique et administrative de la zone du projet**

Aspect	Détails
Wilaya	Tamanrasset
Commune	Aïn Salah
Position géographique	Grand Sud algérien, Sahara central
PK de début	PK 410+500
PK de fin	PK 427+329
Longueur du tronçon	16 800 m (16,8 km)
Gare incluse	Gare de Moulay Lahcen (PK 418+200)
Zone sismique (RPA2024)	Zone 0 — sismicité négligeable

XIV.42 Ressources physiques, biologiques et humaines**Tableau XIV.3 : Synthèse des caractéristiques des ressources physiques et biologiques de la zone d'étude**

Ressource	Type	Description
Relief	Physique	Plateau désertique plat à légèrement ondulé (reg saharien). Altitudes relativement homogènes sur le tracé, avec quelques inflexions liées aux oueds franchis.
Climat	Physique	Hyperaride. Température maximale absolue : 45 °C. Température minimale absolue : 6 °C. Température moyenne annuelle : 25 à 27 °C. Précipitations annuelles < 50 mm, mais crues éclairs possibles. Vitesse maximale du vent : 4,9 m/s — vents dominants NE–SW (Sirocco).
Géologie / Hydrogéologie	Physique	Formations du massif du Hoggar (grès quartzitiques, calcaires). Eaux souterraines profondes. Risque de sols agressifs chimiquement (sulfates SO_4^{2-} identifiés dans les zones d'oueds).
Réseau hydrographique	Physique	55 bassins versants recensés sur le tronçon. Oueds à régime torrentiel lors des crues éclairs. Débit centennal significatif pour BV44, BV45, BV47, BV51 et BV54.
Flore	Biologique	Végétation éparse et adaptée au milieu hyperaride : formations d'Haloxylon, Tamarix, Atriplex dans les lits des oueds. Absence de forêts. Quelques formations d'Acacia sur les berges.
Faune	Biologique	Faune désertique : reptiles (varans, lézards), mammifères (fennecs, gazelles, mouflon à manchettes), oiseaux (rapaces, outardes houbara — espèce protégée). Présence notable de l'outarde houbara (espèce menacée, protégée par l'ordonnance n° 06-05).
Milieu humain	Humaine	Zone très peu peuplée. Pas d'habitations dans la zone directe du projet. Population nomade (pastoralisme saharien) présente de manière saisonnière. Aucune zone résidentielle permanente à proximité immédiate du tracé.
Activités économiques	Humaine	Élevage nomade (dromadaires, ovins, caprins). Activités minières et pétrolières dans la région de Tamanrasset. La

Ressource	Type	Description
		ligne ferroviaire s'inscrit dans la logique de desserte des ressources minières du Sud.
Infrastructures existantes	Humaine	Route nationale. Réseau aéroportuaire d'Aïn Salah. Ligne ferroviaire en cours de construction (pénétrante centre).

XIV.5 Ensablement éolien — contrainte environnementale majeure

La zone entre PK 418+000 et PK 421+500 est soumise à un phénomène d'ensablement éolien actif dû aux vents dominants NE–SW (Sirocco) dont la vitesse peut atteindre 4,9 m/s. Ce phénomène constitue la principale contrainte environnementale spécifique au projet et génère des impacts mutuels :

- Impact du projet sur l'environnement : la plateforme ferroviaire modifie localement les flux éoliens et peut accentuer le dépôt de sable dans certaines zones.
- Impact de l'environnement sur le projet : l'accumulation de sable sur les voies est le risque opérationnel le plus critique pour l'exploitation de la ligne.

Les mesures de protection retenues comprennent des palissades en bois perpendiculaires aux vents dominants, des filets brise-vent, une végétalisation avec des espèces adaptées (Atriplex, Haloxylon, Tamarix) et des dispositifs de drainage/captation du sable (pièges à sable).

XIV.6 L'impact du projet

XIV.6.1 Les impacts positifs

Tableau XIV.4 : Impacts positifs du projet

Impacts directs	Impacts indirects
• Désenclavement des wilayas du Grand Sud (Tamanrasset, In Salah) par un moyen de transport structurant. • Réduction des temps de trajet entre le nord et le sud du pays. • Création d'emplois directs pendant la phase de construction et d'exploitation. • Transport de voyageurs à grande vitesse (220 km/h) dans des conditions de confort adaptées au milieu saharien.	• Réduction du trafic routier sur les axes saharariens, diminution des accidents de la route et de la pollution atmosphérique des camions. • Amélioration de l'accessibilité de la région, attraction de nouvelles entreprises et investissements. • Soutien aux activités minières et pétrolières du Grand Sud par un transport de marchandises efficace. • Renforcement de la cohésion territoriale nationale.

XIV.62 Les impacts négatifs et les mesures d'atténuation**Tableau XIV.5 : Impacts négatifs et mesures d'atténuation.**

Catégorie d'impact	Impacts négatifs identifiés	Mesures d'atténuation proposées
Sols	Compactage des sols par les engins de chantier, réduisant la perméabilité. Risque de pollution par les hydrocarbures (engins) et les eaux de lavage. Modification du drainage naturel par la plateforme ferroviaire.	Gestion rigoureuse des déchets liquides et des rejets de chantier. Stabilisation des remblais et protection contre l'érosion éolienne. Contrôle strict des zones de dépôt de matériaux excédentaires.
Air et bruit	Émissions de poussières lors des terrassements (sables fins mobilisés). Bruit des engins de chantier. Lors de l'exploitation : bruit des trains à 220 km/h bien que la zone soit peu peuplée.	Arrosage régulier des zones de travail. Limitation des vitesses des engins. Écrans acoustiques non nécessaires en zone désertique éloignée, mais vitesse adaptée à l'approche des rares zones habitées.
Eaux de surface et souterraines	Risque de pollution des oueds lors de la construction (sédiments, hydrocarbures). Modification des écoulements lors du franchissement des oueds par les ouvrages hydrauliques.	Conception soignée des ouvrages hydrauliques (dalots, buses) assurant le libre passage des crues centennales. Stockage des produits polluants sur aires étanches éloignées des oueds. Protection des berges des oueds franchis.
Flore	Décapage du couvert végétal (rare mais présent dans les lits d'oueds) lors des terrassements. Perturbation des formations ripicoles (Tamarix, Acacia) au droit des franchissements.	Limitation au strict nécessaire du décapage de la végétation. Re-végétalisation des zones perturbées avec des espèces locales adaptées (Haloxylon, Atriplex, Tamarix). Limitation des pistes de chantier aux zones définies.
Faune	Perturbation des espèces sensibles — notamment l'outarde houbara (espèce protégée) — pendant la phase	Planification des travaux hors des périodes de reproduction de l'outarde houbara (février–mai). Vitesse réduite des trains en zones d'habitat critique

Catégorie d'impact	Impacts négatifs identifiés	Mesures d'atténuation proposées
	travaux. Fragmentation des corridors de déplacement de la faune saharienne.	identifiées. Sensibilisation des équipes de chantier à la faune protégée.
Milieu humain	Perturbation possible des déplacements des nomades et de leurs troupeaux. Risques d'accidents liés au chantier.	Balisage clair du chantier. Information des populations nomades sur le calendrier et les zones de travaux. Maintien des passages des troupeaux à travers des passages aménagés sous la plateforme.
Patrimoine archéologique	La région de Tamanrasset est riche en sites archéologiques (gravures rupestres, sites préhistoriques). Risque de perturbation lors des terrassements.	Réalisation d'une campagne de prospection archéologique préalable aux travaux. Arrêt des travaux et signalement immédiat en cas de découverte fortuite.

XIV.7. Influence de l'environnement sur la réalisation du projet

L'environnement saharien du tronçon PK 410+500 – PK 427+329 exerce des contraintes spécifiques sur la réalisation et l'exploitation du projet, qui ont été intégrées dès la phase APD :

- Risques hydrologiques : les crues éclaircies des 55 bassins versants recensés constituent le principal risque d'interruption des travaux et d'endommagement des ouvrages. Les dimensionnements hydrauliques sont basés sur la crue centennale conformément aux prescriptions de la fiche UIC 719R.
- Ensablement éolien : les tempêtes de sable peuvent interrompre les travaux, endommager les équipements et compromettre l'exploitation. Les mesures de protection (palissades, végétalisation, drainage) sont intégrées dans le projet.
- Températures extrêmes : les températures atteignant 45 °C imposent des contraintes sur les conditions de travail (horaires adaptés), le choix des matériaux (béton CRS résistant aux sulfates, RSL avec température de neutralisation adaptée) et la maintenance des équipements électromécaniques.
- Agressivité chimique des sols : la présence de sulfates ($\text{SO}_4^{2-} = 2,10\text{--}2,40\%$) dans les zones d'oueds impose l'utilisation de ciment CRS pour tous les ouvrages en contact avec le sol saturé.

Commentaire : L'intégration des contraintes environnementales dès l'étude APD a permis d'anticiper les risques écologiques et d'évaluer précisément la faisabilité du projet. Un suivi rigoureux de la mise en œuvre des mesures d'atténuation sera indispensable pendant la phase

travaux, notamment concernant la protection de l'outarde houbara et la gestion des risques hydrologiques.

XIV.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'analyse des impacts environnementaux du tronçon ferroviaire PK 410+500 – PK 427+329 dans la wilaya de Tamanrasset. L'environnement saharien du Grand Sud, bien que peu peuplé, présente des richesses naturelles spécifiques — notamment la faune désertique protégée et le patrimoine archéologique — qui nécessitent une attention particulière.

Les principaux enseignements de cette étude sont :

- Les impacts positifs du projet sont majeurs et structurants pour le développement du Grand Sud algérien : désenclavement, création d'emplois, soutien aux activités économiques.
- Les impacts négatifs sont principalement liés à la phase de construction et peuvent être efficacement atténués par des mesures adaptées au contexte saharien.
- La contrainte environnementale la plus spécifique au projet est l'ensablement éolien, qui est à la fois un impact du projet sur le milieu et un risque permanent pour l'exploitation.
- La protection de l'outarde houbara (espèce protégée présente dans la zone) constitue une obligation réglementaire stricte qui doit être intégrée dans le plan d'exécution des travaux.

La réussite de ce projet passe par un engagement constant envers la durabilité environnementale et une adaptation proactive des stratégies d'atténuation aux spécificités du milieu saharien du Grand Sud algérien.

CHAPITRE XV : DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF

CHAPITRE XV : DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF

Tableau XV-1 devis quantitatif estimatif.

DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF — SECTION 04 : PK 410+500 – PK 427+329						
Pénétrante ferroviaire centre Aïn Salah – Tamanrasset Voie unique électrifiée Vp = 220 km/h Gare de Moulay Lahcen (PK 418+200) Wilaya de Tamanrasset						
N°	Réf.	DÉSIGNATION DES OUVRAGES	Unité	Quantité	P.U. (DA HT)	Montant HT (DA)
1	INSTALLATIONS GÉNÉRALES ET TRAVAUX PRÉPARATOIRES					
	1.01	Amenée du matériel et installation générale de chantier (base-vie, ateliers, magasins, pistes sahariens)	Fft	1,00	100 000 000	100 000 000
	1.02	Fourniture et installation d'un laboratoire de chantier agréée (béton, géotechnique)	Fft	1,00	20 000 000	20 000 000
	1.03	Étude d'exécution et plans de récolement — réseaux existants + tronçon	Fft	1,00	80 000 000	80 000 000
TOTAL CHAPITRE 1					200 000 000	
2	TERRASSEMENTS GÉNÉRAUX					
	2.01	Décapage des terres végétales (ép. 0,20 m)	m³	53 940,00	527	28 426 380
	2.02	Déblais en terres mis en dépôt (foisonnement 1,10)	m³	238 510,00	570	135 950 700
	2.03	Remblai provenant des zones d'emprunt (grave alluvionnaire QS2)	m³	546 049,00	1 300	709 863 700
	2.04	Fourniture et mise en place de géotextile anticontaminant 200 g/m² (zones QS0/QS1)	m²	31 155,00	1 650	51 405 750
	2.05	Matériaux de substitution zone inondable/humide (granulats drainants QS1 — BV44, BV47, BV54)	m³	25 500,00	4 200	107 100 000
TOTAL CHAPITRE 2					1 032 746 530	
3	ASSISE FERROVIAIRE					
	3.01	Fourniture et mise en place couche de forme GNT 0/31,5 mm (QS3 — ép. 0,30 m)	m³	68 873,00	1 000	68 873 000
	3.02	Fourniture et mise en place couche de fondation GNT 0/20 mm (ép. 0,25 m)	m³	36 411,00	3 300	98 309 700
	3.03	Fourniture et mise en place sous-ballast GNT 0/25 mm (ép. 0,25 m)	m³	42 501,00	2 700	143 440 875
	3.04	Fourniture et mise en place ballast classe A — granite/quartzite 25/50 mm (Hoggar — ép. 0,35 m)	m³	48 260,00	7 548	364 266 480
TOTAL CHAPITRE 3					674 890 055	
4	DRAINAGE ET ASSAINISSEMENT					
— Buses circulaires en béton armé —						

	4.03	Buse BA Ø 1 500 mm × 20 ml)	ml	880,00	50 000	44 000 000
— <i>Dalots rectangulaires</i> —						
	4.04	Dalot BA (2×2)×1 cellule — BV37 (PK 417+450) Q=7,34 m³/s	m³BA	70,00	52 000	3 640 000
	4.05	Dalot BA (2,5×2)×1 cellule — BV25 (PK 414+715) Q=8,73 m³/s	m³BA	88,00	52 000	4 576 000
	4.06	Dalot BA (4×2)×2 cellules — BV6 (PK 411+497) Q=20,19 m³/s + BV7 (PK 411+571) Q=18,47 m³/s	m³BA	240,00	55 000	13 200 000
	4.07	Dalot BA (4×3)×2 cellules — BV44 (PK 420+675) Q=43,69 m³/s	m³BA	320,00	60 000	19 200 000
	4.08	Dalot BA (4×3)×2 cellules — BV45 (PK 421+400) Q=41,79 m³/s	m³BA	320,00	60 000	19 200 000
	4.09	Dalot BA (3×2)×3 cellules — BV47 (PK 423+675) Q=32,23 m³/s	m³BA	230,00	55 000	12 650 000
	4.10	Dalot BA (4×3)×2 cellules — BV51 (PK 425+882) Q=39,33 m³/s	m³BA	320,00	60 000	19 200 000
	4.11	Dalot BA (3×2)×1 cellule — BV52 (PK 426+242) Q=13,62 m³/s	m³BA	115,00	52 000	5 980 000
	4.12	Dalot BA (6×4)×4 cellules — BV54 (PK 426+957) Q=130,72 m³/s — OUVRAGE MAJEUR — béton CRS	m³BA	1 200,00	65 000	78 000 000
	4.13	Dalot BA (2×2)×2 cellules — BV55 (PK 427+095) Q=7,05 m³/s	m³BA	140,00	55 000	7 700 000
— <i>Assainissement longitudinal</i> —						
	4.14	Fossé trapézoïdal béton armé CRS (b=0,50×h=0,50 m) — zones de déblai	ml	17 300,00	5 900	102 070 000
	4.15	Semi-buse DN 400 mm — pied de talus remblai (protection érosion)	ml	10 525,00	5 880	61 887 000
	4.16	Regards de visite béton armé couvercle fonte ductile	U	346,00	45 000	15 570 000
TOTAL CHAPITRE 4					399 653 000	
5	TRAVAUX DE VOIE					
	5.01	Fourniture rails neufs UIC 60 E1 (60,34 kg/ml)— RSL	T	2 351,70	330 000	776 061 000
	5.02	Pose voie à blanc (pleine voie + gare 4 voies)	ml	19 487,00	8 940	174 213 780
	5.03	Fourniture traverses monobloc béton précontraint (pleine voie	U	24 799,00	15 000	371 985 000
	5.04	Fourniture traverses bibloc béton	U	9 303,00	10 000	93 030 000
	5.05	Fourniture attaches élastiques vousloh / Pandrol attaches/traverse)	U	136 409,00	1 400	190 972 600
	5.06	Soudure aluminothermique — joints pleine voie	U	788,00	22 451	17 691 388
	5.07	Soudure électrique (liaisons isolantes, reprise gare)	U	148,00	22 451	3 322 748

TOTAL CHAPITRE 5					1 627 276 516
6	TRAVAUX DE LA GARE DE MOULAY LAHCEN				
6.01	Fourniture ADV UIC 60 E1-500-1/12 (R500 — V dév.=60 km/h) — entrée/sortie V1	U	2,00	26 000 000	52 000 000
6.02	Fourniture ADV UIC 60 E1-300-1/9 (R300 — V dév.=40 km/h) — V2/V3/V4 gare	U	6,00	22 000 000	132 000 000
6.03	Pose des 8 ADV (mise en œuvre, soudures, réglage géométrique)	U	8,00	1 200 000	9 600 000
6.04	Traverses de garage franc	U	477,00	59 307	28 289 439
6.05	Bâtiment voyageurs (BV) — structure béton armé, finitions, climatisation	m²	400,00	120 000	48 000 000
6.06	Fourniture et pose quais voyageurs béton armé h=550 mm (2 quais × 225 m)	ml	1 050,00	185 000	83 250 000
6.07	Passage souterrain piétons (liaison quais sous voies)	Fft	1,00	45 000 000	45 000 000
6.08	Heurtoirs	U	3,00	850 000	2 550 000
6.09	VRD, clôture, éclairage extérieur, voirie gare	Fft	1,00	35 000 000	35 000 000
TOTAL CHAPITRE 6					546 689 439
7	SIGNALISATION ET ÉLECTRIFICATION				
7.01	Système BAL complet (feux lumineux, supports, relais, câblage — 15 500 m)	Fft	1,00	120 000 000	120 000 000
7.02	Poste d'Aiguillage Informatisé (PAI) gare de Moulay Lahcen — commande 8 ADV	Fft	1,00	85 000 000	85 000 000
7.03	ERTMS Niveau 2 — GSM-R (eurobalises, unités embarquées, supervision PCC)	Fft	1,00	95 000 000	95 000 000
7.04	Câblage signalisation et télécoms (fourreaux, câbles, boîtes de tirage)	ml	31 000,00	12 000	372 000 000
7.05	Électrification 25 kV/50 Hz (caténaire, pylônes, sous-stations)	Fft	1,00	255 000 000	255 000 000
TOTAL CHAPITRE 7					927 000 000
8	PROTECTION CONTRE L'ENSABLEMENT (PK 418+000 – PK 421+500)				
8.01	Palissades en bois/roseau h=1,50 m (double rangée perpendiculaire vent dominant NE–SW)	ml	7 000,00	3 500	24 500 000
8.02	Filets brise-vent grillage plastifié h=2 m	ml	7 000,00	2 800	19 600 000
8.03	Végétalisation (Haloxylon, Atriplex) — plantation, ensemencement, arrosage provisoire	m²	210 000,00	650	136 500 000
8.04	Enduit anti-éolien bitumineux sur talus de remblai (émulsion 65 %)	m²	52 500,00	450	23 625 000
TOTAL CHAPITRE 8					204 225 000

MONTANT TOTAL HORS TAXES (DA)		5 612 480 540
TVA 19 %		1 066 371 303
MONTANT TOTAL TTC (DA)		6 678 851 843

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le développement des infrastructures ferroviaires constitue un élément essentiel dans la dynamique du développement économique et social, en assurant une meilleure mobilité des personnes et des marchandises tout en favorisant l'intégration territoriale. Dans cette optique, notre projet de fin d'études a porté sur l'étude d'un tronçon de ligne ferroviaire reliant la région d'Ain Salah, s'étendant du PK 410+500 au PK 427+329, avec la conception d'une gare voyageurs au niveau de « Moulay Lahcen » située au PK 418+200.

Ce travail nous a permis de mettre en pratique les connaissances théoriques acquises durant notre cursus universitaire et de nous familiariser avec les différentes étapes de conception d'un projet ferroviaire. À travers cette étude, nous avons développé nos compétences dans le domaine du tracé ferroviaire, du dimensionnement des infrastructures ainsi que dans l'utilisation des logiciels spécialisés tels que AutoCAD, Covadis et Global Mapper.

L'étude a été réalisée conformément aux normes et recommandations en vigueur, tout en tenant compte des exigences de sécurité, de confort, d'exploitation et de protection de l'environnement. Une attention particulière a été accordée au choix des solutions techniques les plus adaptées aux caractéristiques géographiques et aux contraintes du terrain traversé.

Enfin, ce projet nous a permis d'acquérir une expérience enrichissante et une meilleure compréhension des enjeux liés aux projets ferroviaires. Il représente une contribution à l'amélioration des infrastructures de transport dans la région d'Ain Salah et met en évidence l'importance du transport ferroviaire dans le développement durable et l'aménagement du territoire.

LA BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Cours voie ferrée Mr. Morsli. ENSTP.
- [2] : SNTF : REFERENTIEL TECHNIQUE SNTF Chapitre 6
Géométrie de la voie Version 2 du 22/12/2005.
- [3] : SNTF : REFERENTIEL TECHNIQUE SNTF Chapitre 6
Géométrie de la voie Version 2 du 22/12/2005.
- [4] : SNCF. (2006). IN 0272 Conception du tracé de la voie courante inf
220 km. Paris.
- [5] : UIC 719 R a et b, Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaire,
2e Edition.
- [6] : UIC (741 OR). Quais des gares à voyageurs-Règles pour
l'implantation des bordures des quais par rapport à la voie. 3e Edition.
- [7] : SETS, « Rapport de l'étude géologique et géotechnique ».
- [8] : SETS, « Rapport de l'étude hydrologique et hydraulique ».
- [9] : Cours hydraulique et assainissement de Mr. Rahmani ENSTP
- [10] : Stéra, Guide technique : Assainissement routier, Octobre 2006.
AIN SALAH— Wikipédia (wikipedia.org).

ANNEXES

Listing Axe En Plan

Axe En Plan					
Date du listing		24/05/2026 à 12:58:26			
Elts Caractéristiques			Points de Contacts		
Nom	Paramètres	Longueur	Abscisse	X	Y
Droite 1	Gisement 138.98gr	1160,353	410+500.000	660958,723	2741565,985
Clothoïde 1	Paramètre -727,324	180,000	411+660.353	661908,236	2740899,019
Arc 1	Rayon -2300.000 m	832,661	411+890.353	662094,194	2740763,712
	Centre X 660679.750 m				
	Centre Y 2738950.056 m				
Clothoïde 2	Paramètre 727,324	180,000	412+723.014	662644,854	2740145,199
Droite 2	Gisement 168.40gr	432,056	412+953.014	662757,740	2739944,837
Clothoïde 3	Paramètre 742,967	160,000	413+385.070	662963,518	2739564,932
Arc 2	Rayon 2400.000 m	1512,461	413+615.070	663076,266	2739364,490
	Centre X 665129.403 m				
	Centre Y 2740607.322 m				
Clothoïde 4	Paramètre -742,967	160,000	415+127.531	664203,045	2738393,307
Droite 3	Gisement 122.18gr	588,457	415+357.531	664417,927	2738311,361
Clothoïde 5	Paramètre -889,944	110,000	415+945.988	664971,038	2738110,490
Arc 3	Rayon -3600.000 m	1794,504	416+165.988	665177,040	2738033,293
	Centre X 663845.366 m				
	Centre Y 2734688.649 m				
Clothoïde 6	Paramètre 889,944	110,000	417+960.492	666614,018	2736989,642
Droite 4	Gisement 157.80gr	2626,323	418+180.492	666751,153	2736817,625
Clothoïde 7	Paramètre 883,176	100,000	420+806.815	668367,315	2734747,457
Arc 4	Rayon 4000.000 m	1000,132	421+001.815	668488,554	2734594,735
	Centre X 671580.576 m				
	Centre Y 2737132.332 m				
Clothoïde 8	Paramètre -883,176	100,000	422+001.947	669212,595	2733908,566
Droite 5	Gisement 138.78gr	191,984	422+196.947	669371,604	2733795,699
Clothoïde 9	Paramètre -538,749	180,000	422+388.931	669529,056	2733685,850
Arc 5	Rayon -2150.000 m	1549,319	422+523.931	669638,955	2733607,455
	Centre X 668354.032 m				
	Centre Y 2731883.659 m				
Clothoïde 10	Paramètre 538,749	180,000	424+073.250	670456,964	2732331,070
Droite 6	Gisement 188.65gr	872,069	424+208.250	670482,286	2732198,472
Clothoïde 11	Paramètre 813,327	150,000	425+080.319	670636,898	2731340,218
Arc 6	Rayon 2700.000 m	828,665	425+325.319	670683,971	2731099,806
	Centre X 673316.753 m				
	Centre Y 2731698.521 m				
Clothoïde 12	Paramètre -813,327	150,000	426+153.984	670987,882	2730332,375
Droite 7	Gisement 163.34gr	930,752	426+398.984	671118,169	2730124,916
			427+329.736	671625,038	2729344,286
Longueur totale de l'axe 16829.736 mètre(s)					

Listing Profil En Long Projet

Profil En Long Projet

Date du listing 24/05/2026 à 12:59:30

Els Caractéristiques			Points de Contacts	
Nom	Pente / Rayon	Longueur	Abscisse	Altitude
Pente 1	Pente 0.42 %	170,038	410+500.000	879,995
Cercle 1	Rayon -18000.000 m	265,516	410+670.038	880,717
	Sommet Absc. 410+746.424 m			
	Sommet Alt. 880.879 m			
Pente 2	Pente -1.05 %	245,431	410+935.554	879,885
Cercle 2	Rayon 18000.000 m	334,492	411+180.985	877,306
	Sommet Absc. 411+370.115 m			
	Sommet Alt. 876.313 m			
Pente 3	Pente 0.81 %	910,147	411+515.477	876,900
Cercle 3	Rayon 50000.000 m	121,754	412+425.624	884,250
	Sommet Absc. 412+021.842 m			
	Sommet Alt. 882.619 m			
Pente 4	Pente 1.05 %	537,687	412+547.378	885,381
Cercle 4	Rayon -20000.000 m	151,785	413+085.065	891,033
	Sommet Absc. 413+295.279 m			
	Sommet Alt. 892.138 m			
Pente 5	Pente 0.29 %	2154,000	413+236.850	892,053
Cercle 5	Rayon 22000.000 m	136,289	415+490.850	898,345
	Sommet Absc. 415+326.579 m			
	Sommet Alt. 898.252 m			
Pente 6	Pente 0.91 %	1058,979	415+527.139	899,166
Cercle 6	Rayon -30000.000 m	134,370	416+586.118	908,820
	Sommet Absc. 416+859.610 m			
	Sommet Alt. 910.067 m			
Pente 7	Pente 0.46 %	1469,106	416+720.488	909,744
Cercle 7	Rayon -25000.000 m	115,935	418+389.593	916,557
	Sommet Absc. 418+305.528 m			
	Sommet Alt. 916.826 m			
Pente 8	Pente 0.00 %	1324,648	418+305.528	916,826
Cercle 8	Rayon -30000.000 m	138,544	419+630.177	916,826
	Sommet Absc. 419+630.177 m			
	Sommet Alt. 916.826 m			
Pente 9	Pente -0.46 %	7561,016	419+768.720	916,506
			427+329.736	881,588
Longueur totale de l'axe 16829.736 mètre(s)				
Longueur développée totale de l'axe 16829.985 mètre(s)				

Canalisations circulaires partiellement remplies

Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh
0,0021	0,189	0,033	0,0600	0,548	0,166	0,1179	0,670	0,232	0,1758	0,750	0,283	0,2337	0,814	0,329	0,2916	0,866	0,370
0,0031	0,219	0,040	0,0611	0,551	0,167	0,1190	0,672	0,233	0,1769	0,752	0,284	0,2348	0,815	0,329	0,2927	0,867	0,371
0,0042	0,249	0,048	0,0621	0,554	0,169	0,1200	0,674	0,234	0,1779	0,753	0,285	0,2359	0,816	0,330	0,2938	0,867	0,371
0,0053	0,266	0,053	0,0632	0,557	0,170	0,1211	0,676	0,235	0,1790	0,755	0,286	0,2369	0,817	0,331	0,2948	0,868	0,372
0,0064	0,278	0,057	0,0643	0,560	0,172	0,1222	0,677	0,236	0,1801	0,756	0,287	0,2380	0,818	0,332	0,2959	0,869	0,373
0,0074	0,290	0,061	0,0653	0,563	0,173	0,1233	0,679	0,237	0,1812	0,757	0,288	0,2391	0,819	0,333	0,2970	0,870	0,373
0,0085	0,302	0,065	0,0664	0,566	0,175	0,1243	0,681	0,238	0,1822	0,759	0,289	0,2401	0,820	0,333	0,2981	0,871	0,374
0,0096	0,315	0,069	0,0675	0,569	0,176	0,1254	0,682	0,239	0,1833	0,760	0,290	0,2412	0,821	0,334	0,2991	0,872	0,375
0,0107	0,327	0,073	0,0686	0,571	0,177	0,1265	0,684	0,240	0,1844	0,762	0,290	0,2423	0,822	0,335	0,3002	0,873	0,376
0,0117	0,337	0,076	0,0696	0,574	0,179	0,1275	0,686	0,241	0,1855	0,763	0,291	0,2434	0,823	0,336	0,3013	0,874	0,376
0,0128	0,344	0,079	0,0707	0,576	0,180	0,1286	0,687	0,242	0,1865	0,764	0,292	0,2444	0,824	0,337	0,3023	0,874	0,377
0,0139	0,352	0,082	0,0718	0,579	0,181	0,1297	0,689	0,243	0,1876	0,766	0,293	0,2455	0,825	0,337	0,3034	0,875	0,378
0,0149	0,360	0,085	0,0729	0,582	0,183	0,1308	0,691	0,244	0,1887	0,767	0,294	0,2466	0,826	0,338	0,3045	0,876	0,378
0,0160	0,367	0,088	0,0739	0,584	0,184	0,1318	0,692	0,245	0,1897	0,768	0,295	0,2477	0,828	0,339	0,3056	0,877	0,379
0,0171	0,375	0,090	0,0750	0,587	0,185	0,1329	0,694	0,246	0,1908	0,770	0,296	0,2487	0,829	0,340	0,3066	0,878	0,380
0,0182	0,382	0,093	0,0761	0,589	0,187	0,1340	0,696	0,247	0,1919	0,771	0,297	0,2498	0,830	0,341	0,3077	0,879	0,381
0,0192	0,390	0,096	0,0771	0,592	0,188	0,1351	0,698	0,248	0,1930	0,773	0,298	0,2509	0,831	0,341	0,3088	0,880	0,381
0,0203	0,397	0,099	0,0782	0,594	0,189	0,1361	0,699	0,250	0,1940	0,774	0,299	0,2519	0,832	0,342	0,3099	0,881	0,382
0,0214	0,404	0,101	0,0793	0,597	0,190	0,1372	0,701	0,251	0,1951	0,775	0,300	0,2530	0,833	0,343	0,3109	0,881	0,383
0,0224	0,409	0,103	0,0804	0,599	0,192	0,1383	0,702	0,251	0,1962	0,777	0,300	0,2541	0,834	0,344	0,3120	0,882	0,384
0,0235	0,415	0,105	0,0814	0,602	0,193	0,1393	0,704	0,252	0,1972	0,778	0,301	0,2552	0,835	0,345	0,3131	0,883	0,384
0,0246	0,420	0,108	0,0825	0,604	0,194	0,1404	0,705	0,253	0,1983	0,779	0,302	0,2562	0,836	0,345	0,3141	0,884	0,385
0,0257	0,425	0,110	0,0836	0,607	0,196	0,1415	0,706	0,254	0,1994	0,780	0,303	0,2573	0,837	0,346	0,3152	0,885	0,386
0,0267	0,431	0,112	0,0846	0,609	0,197	0,1426	0,708	0,255	0,2005	0,781	0,304	0,2584	0,838	0,347	0,3163	0,886	0,386
0,0278	0,436	0,114	0,0857	0,612	0,198	0,1436	0,709	0,256	0,2015	0,782	0,304	0,2594	0,839	0,348	0,3174	0,887	0,387
0,0289	0,441	0,116	0,0868	0,615	0,200	0,1447	0,710	0,257	0,2026	0,783	0,305	0,2605	0,840	0,349	0,3184	0,887	0,388
0,0300	0,447	0,118	0,0879	0,617	0,201	0,1458	0,712	0,258	0,2037	0,784	0,306	0,2616	0,841	0,349	0,3195	0,888	0,389
0,0310	0,452	0,120	0,0889	0,619	0,202	0,1468	0,713	0,259	0,2048	0,785	0,307	0,2627	0,842	0,350	0,3206	0,889	0,389
0,0321	0,457	0,122	0,0900	0,621	0,203	0,1479	0,715	0,260	0,2058	0,786	0,308	0,2637	0,843	0,351	0,3216	0,890	0,390
0,0332	0,463	0,125	0,0911	0,623	0,204	0,1490	0,716	0,261	0,2069	0,787	0,308	0,2648	0,844	0,352	0,3227	0,891	0,391
0,0342	0,467	0,126	0,0922	0,625	0,205	0,1501	0,717	0,261	0,2080	0,788	0,309	0,2659	0,845	0,352	0,3238	0,892	0,391
0,0353	0,471	0,128	0,0932	0,627	0,206	0,1511	0,719	0,262	0,2090	0,789	0,310	0,2670	0,846	0,353	0,3249	0,893	0,392
0,0364	0,474	0,130	0,0943	0,629	0,208	0,1522	0,720	0,263	0,2101	0,790	0,311	0,2680	0,847	0,354	0,3259	0,894	0,393
0,0375	0,478	0,132	0,0954	0,631	0,209	0,1533	0,721	0,264	0,2112	0,791	0,312	0,2691	0,848	0,355	0,3270	0,894	0,394
0,0385	0,481	0,133	0,0964	0,632	0,210	0,1544	0,723	0,265	0,2123	0,792	0,312	0,2702	0,848	0,355	0,3281	0,895	0,394
0,0396	0,485	0,135	0,0975	0,634	0,211	0,1554	0,724	0,266	0,2133	0,794	0,313	0,2712	0,849	0,356	0,3292	0,896	0,395
0,0407	0,489	0,137	0,0986	0,636	0,212	0,1565	0,726	0,267	0,2144	0,795	0,314	0,2723	0,850	0,357	0,3302	0,897	0,396
0,0418	0,492	0,139	0,0997	0,638	0,213	0,1576	0,727	0,268	0,2155	0,796	0,315	0,2734	0,851	0,357	0,3313	0,898	0,397
0,0428	0,496	0,140	0,1007	0,640	0,214	0,1586	0,728	0,269	0,2166	0,797	0,316	0,2745	0,852	0,358	0,3324	0,899	0,397
0,0439	0,500	0,142	0,1018	0,642	0,215	0,1597	0,730	0,270	0,2176	0,798	0,317	0,2755	0,853	0,359	0,3334	0,900	0,398
0,0450	0,503	0,144	0,1029	0,644	0,216	0,1608	0,731	0,270	0,2187	0,799	0,317	0,2766	0,854	0,360	0,3345	0,900	0,399
0,0460	0,507	0,146	0,1040	0,646	0,217	0,1619	0,733	0,271	0,2198	0,800	0,318	0,2777	0,854	0,360	0,3356	0,901	0,399
0,0471	0,511	0,147	0,1050	0,648	0,219	0,1629	0,734	0,272	0,2208	0,801	0,319	0,2788	0,855	0,361	0,3367	0,902	0,400
0,0482	0,514	0,149	0,1061	0,650	0,220	0,1640	0,735	0,273	0,2219	0,802	0,320	0,2798	0,856	0,362	0,3377	0,903	0,401
0,0493	0,518	0,151	0,1072	0,652	0,221	0,1651	0,737	0,274	0,2230	0,803	0,321	0,2809	0,857	0,363	0,3388	0,904	0,401
0,0503	0,521	0,152	0,1082	0,654	0,222	0,1661	0,738	0,275	0,2241	0,804	0,321	0,2820	0,858	0,363	0,3399	0,904	0,402
0,0514	0,524	0,154	0,1093	0,656	0,223	0,1672	0,739	0,276	0,2251	0,805	0,322	0,2830	0,859	0,364	0,3410	0,905	0,403
0,0525	0,527	0,155	0,1104	0,658	0,224	0,1683	0,741	0,277	0,2262	0,806	0,323	0,2841	0,860	0,365	0,3420	0,906	0,403
0,0535	0,530	0,157	0,1115	0,660	0,225	0,1694	0,742	0,278	0,2273	0,807	0,324	0,2852	0,861	0,365	0,3431	0,906	0,404

0,0546	0,533	0,158	0,1125	0,662	0,226	0,1704	0,744	0,279	0,2283	0,808	0,325	0,2863	0,861	0,366	0,3442	0,907	0,405
0,0557	0,536	0,160	0,1136	0,664	0,227	0,1715	0,745	0,280	0,2294	0,809	0,325	0,2873	0,862	0,367	0,3452	0,908	0,405
0,0568	0,539	0,161	0,1147	0,665	0,228	0,1726	0,746	0,280	0,2305	0,811	0,326	0,2884	0,863	0,368	0,3463	0,909	0,406
0,0578	0,542	0,163	0,1157	0,667	0,229	0,1737	0,748	0,281	0,2316	0,812	0,327	0,2895	0,864	0,368	0,3474	0,909	0,407
0,0589	0,545	0,164	0,1168	0,669	0,230	0,1747	0,749	0,282	0,2326	0,813	0,328	0,2905	0,865	0,369	0,3485	0,910	0,407
0,3495	0,911	0,408	0,4074	0,949	0,444	0,4653	0,981	0,479	0,5233	1,010	0,514	0,5812	1,036	0,548	0,6391	1,059	0,581
0,3506	0,911	0,409	0,4085	0,949	0,445	0,4664	0,982	0,480	0,5243	1,011	0,514	0,5822	1,037	0,548	0,6402	1,059	0,582
0,3517	0,912	0,409	0,4096	0,950	0,445	0,4675	0,982	0,481	0,5254	1,011	0,515	0,5833	1,037	0,549	0,6412	1,059	0,583
0,3527	0,913	0,410	0,4107	0,951	0,446	0,4686	0,983	0,481	0,5265	1,012	0,516	0,5844	1,038	0,549	0,6423	1,060	0,583
0,3538	0,913	0,411	0,4117	0,952	0,447	0,4696	0,984	0,482	0,5275	1,012	0,516	0,5855	1,038	0,550	0,6434	1,060	0,584
0,3549	0,914	0,411	0,4128	0,952	0,447	0,4707	0,984	0,482	0,5286	1,013	0,517	0,5865	1,038	0,551	0,6444	1,061	0,584
0,3560	0,915	0,412	0,4139	0,953	0,448	0,4718	0,985	0,483	0,5297	1,013	0,518	0,5876	1,039	0,551	0,6455	1,061	0,585
0,3570	0,916	0,413	0,4149	0,954	0,449	0,4729	0,985	0,484	0,5308	1,014	0,518	0,5887	1,039	0,552	0,6466	1,062	0,586
0,3581	0,916	0,413	0,4160	0,954	0,449	0,4739	0,986	0,484	0,5318	1,014	0,519	0,5897	1,040	0,553	0,6477	1,062	0,586
0,3592	0,917	0,414	0,4171	0,955	0,450	0,4750	0,987	0,485	0,5329	1,015	0,519	0,5908	1,040	0,553	0,6487	1,062	0,587
0,3603	0,918	0,415	0,4182	0,956	0,451	0,4761	0,987	0,486	0,5340	1,015	0,520	0,5919	1,041	0,554	0,6498	1,063	0,588
0,3613	0,918	0,415	0,4192	0,956	0,451	0,4771	0,988	0,486	0,5351	1,016	0,521	0,5930	1,041	0,554	0,6509	1,063	0,588
0,3624	0,919	0,416	0,4203	0,957	0,452	0,4782	0,988	0,487	0,5361	1,016	0,521	0,5940	1,041	0,555	0,6519	1,064	0,589
0,3635	0,920	0,417	0,4214	0,957	0,453	0,4793	0,989	0,488	0,5372	1,017	0,522	0,5951	1,042	0,556	0,6530	1,064	0,589
0,3645	0,921	0,417	0,4225	0,958	0,453	0,4804	0,989	0,488	0,5383	1,017	0,523	0,5962	1,042	0,556	0,6541	1,064	0,590
0,3656	0,921	0,418	0,4235	0,959	0,454	0,4814	0,990	0,489	0,5393	1,018	0,523	0,5973	1,043	0,557	0,6552	1,065	0,591
0,3667	0,922	0,419	0,4246	0,959	0,455	0,4825	0,991	0,490	0,5404	1,018	0,524	0,5983	1,043	0,558	0,6562	1,065	0,591
0,3678	0,923	0,419	0,4257	0,960	0,455	0,4836	0,991	0,490	0,5415	1,019	0,524	0,5994	1,043	0,558	0,6573	1,066	0,592
0,3688	0,923	0,420	0,4267	0,960	0,456	0,4847	0,992	0,491	0,5426	1,019	0,525	0,6005	1,044	0,559	0,6584	1,066	0,592
0,0257	0,425	0,110	0,0836	0,607	0,196	0,1415	0,706	0,254	0,1994	0,780	0,303	0,2573	0,837	0,346	0,3152	0,885	0,386
0,0267	0,431	0,112	0,0846	0,609	0,197	0,1426	0,708	0,255	0,2005	0,781	0,304	0,2584	0,838	0,347	0,3163	0,886	0,386
0,0278	0,436	0,114	0,0857	0,612	0,198	0,1436	0,709	0,256	0,2015	0,782	0,304	0,2594	0,839	0,348	0,3174	0,887	0,387
0,0289	0,441	0,116	0,0868	0,615	0,200	0,1447	0,710	0,257	0,2026	0,783	0,305	0,2605	0,840	0,349	0,3184	0,887	0,388
0,0300	0,447	0,118	0,0879	0,617	0,201	0,1458	0,712	0,258	0,2037	0,784	0,306	0,2616	0,841	0,349	0,3195	0,888	0,389
0,0310	0,452	0,120	0,0889	0,619	0,202	0,1468	0,713	0,259	0,2048	0,785	0,307	0,2627	0,842	0,350	0,3206	0,889	0,389
0,0321	0,457	0,122	0,0900	0,621	0,203	0,1479	0,715	0,260	0,2058	0,786	0,308	0,2637	0,843	0,351	0,3216	0,890	0,390
0,0332	0,463	0,125	0,0911	0,623	0,204	0,1490	0,716	0,261	0,2069	0,787	0,308	0,2648	0,844	0,352	0,3227	0,891	0,391
0,0342	0,467	0,126	0,0922	0,625	0,205	0,1501	0,717	0,261	0,2080	0,788	0,309	0,2659	0,845	0,352	0,3238	0,892	0,391
0,0353	0,471	0,128	0,0932	0,627	0,206	0,1511	0,719	0,262	0,2090	0,789	0,310	0,2670	0,846	0,353	0,3249	0,893	0,392
0,0364	0,474	0,130	0,0943	0,629	0,208	0,1522	0,720	0,263	0,2101	0,790	0,311	0,2680	0,847	0,354	0,3259	0,894	0,393
0,0375	0,478	0,132	0,0954	0,631	0,209	0,1533	0,721	0,264	0,2112	0,791	0,312	0,2691	0,848	0,355	0,3270	0,894	0,394
0,0385	0,481	0,133	0,0964	0,632	0,210	0,1544	0,723	0,265	0,2123	0,792	0,312	0,2702	0,848	0,355	0,3281	0,895	0,394
0,0396	0,485	0,135	0,0975	0,634	0,211	0,1554	0,724	0,266	0,2133	0,794	0,313	0,2712	0,849	0,356	0,3292	0,896	0,395
0,0407	0,489	0,137	0,0986	0,636	0,212	0,1565	0,726	0,267	0,2144	0,795	0,314	0,2723	0,850	0,357	0,3302	0,897	0,396
0,0418	0,492	0,139	0,0997	0,638	0,213	0,1576	0,727	0,268	0,2155	0,796	0,315	0,2734	0,851	0,357	0,3313	0,898	0,397
0,0428	0,496	0,140	0,1007	0,640	0,214	0,1586	0,728	0,269	0,2166	0,797	0,316	0,2745	0,852	0,358	0,3324	0,899	0,397
0,0439	0,500	0,142	0,1018	0,642	0,215	0,1597	0,730	0,270	0,2176	0,798	0,317	0,2755	0,853	0,359	0,3334	0,900	0,398
0,0450	0,503	0,144	0,1029	0,644	0,216	0,1608	0,731	0,270	0,2187	0,799	0,317	0,2766	0,854	0,360	0,3345	0,900	0,399
0,0460	0,507	0,146	0,1040	0,646	0,217	0,1619	0,733	0,271	0,2198	0,800	0,318	0,2777	0,854	0,360	0,3356	0,901	0,399
0,0471	0,511	0,147	0,1050	0,648	0,219	0,1629	0,734	0,272	0,2208	0,801	0,319	0,2788	0,855	0,361	0,3367	0,902	0,400
0,0482	0,514	0,149	0,1061	0,650	0,220	0,1640	0,735	0,273	0,2219	0,802	0,320	0,2798	0,856	0,362	0,3377	0,903	0,401
0,0493	0,518	0,151	0,1072	0,652	0,221	0,1651	0,737	0,274	0,2230	0,803	0,321	0,2809	0,857	0,363	0,3388	0,904	0,401
0,0503	0,521	0,152	0,1082	0,654	0,222	0,1661	0,738	0,275	0,2241	0,804	0,321	0,2820	0,858	0,363	0,3399	0,904	0,402
0,0514	0,524	0,154	0,1093	0,656	0,223	0,1672	0,739	0,276	0,2251	0,805	0,322	0,2830	0,859	0,364	0,3410	0,905	0,403
0,0525	0,527	0,155	0,1104	0,658	0,224	0,1683	0,741	0,277	0,2262	0,806	0,323	0,2841	0,860	0,365	0,3420	0,906	0,403
0,0535	0,530	0,157	0,1115	0,660	0,225	0,1694	0,742	0,278	0,2273	0,807	0,324	0,2852	0,861	0,365	0,3431	0,906	0,404
0,0546	0,533	0,158	0,1125	0,662	0,226	0,1704	0,744	0,279	0,2283	0,808	0,325	0,2863	0,861	0,366	0,3442	0,907	0,405
0,0557	0,536	0,160	0,1136	0,664	0,227	0,1715	0,745	0,280	0,2294	0,809	0,325	0,2873	0,862	0,367	0,3452	0,908	0,405

0,0568	0,539	0,161	0,1147	0,665	0,228	0,1726	0,746	0,280	0,2305	0,811	0,326	0,2884	0,863	0,368	0,3463	0,909	0,406
0,0578	0,542	0,163	0,1157	0,667	0,229	0,1737	0,748	0,281	0,2316	0,812	0,327	0,2895	0,864	0,368	0,3474	0,909	0,407
0,0589	0,545	0,164	0,1168	0,669	0,230	0,1747	0,749	0,282	0,2326	0,813	0,328	0,2905	0,865	0,369	0,3485	0,910	0,407
0,3495	0,911	0,408	0,4074	0,949	0,444	0,4653	0,981	0,479	0,5233	1,010	0,514	0,5812	1,036	0,548	0,6391	1,059	0,581
0,3506	0,911	0,409	0,4085	0,949	0,445	0,4664	0,982	0,480	0,5243	1,011	0,514	0,5822	1,037	0,548	0,6402	1,059	0,582
0,3517	0,912	0,409	0,4096	0,950	0,445	0,4675	0,982	0,481	0,5254	1,011	0,515	0,5833	1,037	0,549	0,6412	1,059	0,583
0,3527	0,913	0,410	0,4107	0,951	0,446	0,4686	0,983	0,481	0,5265	1,012	0,516	0,5844	1,038	0,549	0,6423	1,060	0,583
0,3538	0,913	0,411	0,4117	0,952	0,447	0,4696	0,984	0,482	0,5275	1,012	0,516	0,5855	1,038	0,550	0,6434	1,060	0,584
0,3549	0,914	0,411	0,4128	0,952	0,447	0,4707	0,984	0,482	0,5286	1,013	0,517	0,5865	1,038	0,551	0,6444	1,061	0,584
0,3560	0,915	0,412	0,4139	0,953	0,448	0,4718	0,985	0,483	0,5297	1,013	0,518	0,5876	1,039	0,551	0,6455	1,061	0,585
0,3570	0,916	0,413	0,4149	0,954	0,449	0,4729	0,985	0,484	0,5308	1,014	0,518	0,5887	1,039	0,552	0,6466	1,062	0,586
0,3581	0,916	0,413	0,4160	0,954	0,449	0,4739	0,986	0,484	0,5318	1,014	0,519	0,5897	1,040	0,553	0,6477	1,062	0,586
0,3592	0,917	0,414	0,4171	0,955	0,450	0,4750	0,987	0,485	0,5329	1,015	0,519	0,5908	1,040	0,553	0,6487	1,062	0,587
0,3603	0,918	0,415	0,4182	0,956	0,451	0,4761	0,987	0,486	0,5340	1,015	0,520	0,5919	1,041	0,554	0,6498	1,063	0,588
0,3613	0,918	0,415	0,4192	0,956	0,451	0,4771	0,988	0,486	0,5351	1,016	0,521	0,5930	1,041	0,554	0,6509	1,063	0,588
0,3624	0,919	0,416	0,4203	0,957	0,452	0,4782	0,988	0,487	0,5361	1,016	0,521	0,5940	1,041	0,555	0,6519	1,064	0,589
0,3635	0,920	0,417	0,4214	0,957	0,453	0,4793	0,989	0,488	0,5372	1,017	0,522	0,5951	1,042	0,556	0,6530	1,064	0,589
0,3645	0,921	0,417	0,4225	0,958	0,453	0,4804	0,989	0,488	0,5383	1,017	0,523	0,5962	1,042	0,556	0,6541	1,064	0,590
0,3656	0,921	0,418	0,4235	0,959	0,454	0,4814	0,990	0,489	0,5393	1,018	0,523	0,5973	1,043	0,557	0,6552	1,065	0,591
0,3667	0,922	0,419	0,4246	0,959	0,455	0,4825	0,991	0,490	0,5404	1,018	0,524	0,5983	1,043	0,558	0,6562	1,065	0,591
0,3678	0,923	0,419	0,4257	0,960	0,455	0,4836	0,991	0,490	0,5415	1,019	0,524	0,5994	1,043	0,558	0,6573	1,066	0,592
0,3688	0,923	0,420	0,4267	0,960	0,456	0,4847	0,992	0,491	0,5426	1,019	0,525	0,6005	1,044	0,559	0,6584	1,066	0,592
0,3699	0,924	0,421	0,4278	0,961	0,457	0,4857	0,992	0,492	0,5436	1,020	0,526	0,6015	1,044	0,559	0,6595	1,066	0,593
0,3710	0,925	0,421	0,4289	0,962	0,457	0,4868	0,993	0,492	0,5447	1,020	0,526	0,6026	1,045	0,560	0,6605	1,067	0,594
0,3721	0,925	0,422	0,4300	0,962	0,458	0,4879	0,994	0,493	0,5458	1,020	0,527	0,6037	1,045	0,561	0,6616	1,067	0,594
0,3731	0,926	0,423	0,4310	0,963	0,459	0,4889	0,994	0,494	0,5469	1,021	0,528	0,6048	1,045	0,561	0,6627	1,068	0,595
0,3742	0,927	0,423	0,4321	0,963	0,459	0,4900	0,995	0,494	0,5479	1,021	0,528	0,6058	1,046	0,562	0,6637	1,068	0,596
0,3753	0,928	0,424	0,4332	0,964	0,460	0,4911	0,995	0,495	0,5490	1,022	0,529	0,6069	1,046	0,563	0,6648	1,069	0,596
0,3763	0,928	0,425	0,4342	0,964	0,460	0,4922	0,996	0,495	0,5501	1,022	0,529	0,6080	1,047	0,563	0,6659	1,069	0,597
0,3774	0,929	0,425	0,4353	0,965	0,461	0,4932	0,996	0,496	0,5511	1,023	0,530	0,6091	1,047	0,564	0,6670	1,069	0,597
0,3785	0,930	0,426	0,4364	0,966	0,462	0,4943	0,997	0,497	0,5522	1,023	0,531	0,6101	1,048	0,564	0,6680	1,070	0,598
0,3796	0,930	0,427	0,4375	0,966	0,462	0,4954	0,998	0,497	0,5533	1,024	0,531	0,6112	1,048	0,565	0,6691	1,070	0,599
0,3806	0,931	0,427	0,4385	0,967	0,463	0,4964	0,998	0,498	0,5544	1,024	0,532	0,6123	1,048	0,566	0,6702	1,071	0,599
0,3817	0,932	0,428	0,4396	0,967	0,464	0,4975	0,999	0,499	0,5554	1,025	0,533	0,6133	1,049	0,566	0,6713	1,071	0,600
0,3828	0,933	0,429	0,4407	0,968	0,464	0,4986	0,999	0,499	0,5565	1,025	0,533	0,6144	1,049	0,567	0,6723	1,071	0,601
0,3838	0,933	0,429	0,4418	0,969	0,465	0,4997	1,000	0,500	0,5576	1,026	0,534	0,6155	1,050	0,568	0,6734	1,072	0,601
0,3849	0,934	0,430	0,4428	0,969	0,466	0,5007	1,000	0,501	0,5586	1,026	0,534	0,6166	1,050	0,568	0,6745	1,072	0,602
0,3860	0,935	0,431	0,4439	0,970	0,466	0,5018	1,001	0,501	0,5597	1,027	0,535	0,6176	1,050	0,569	0,6755	1,072	0,603
0,3871	0,935	0,431	0,4450	0,970	0,467	0,5029	1,001	0,502	0,5608	1,027	0,536	0,6187	1,051	0,569	0,6766	1,073	0,603
0,3881	0,936	0,432	0,4460	0,971	0,468	0,5040	1,002	0,502	0,5619	1,028	0,536	0,6198	1,051	0,570	0,6777	1,073	0,604
0,3892	0,937	0,433	0,4471	0,971	0,468	0,5050	1,002	0,503	0,5629	1,028	0,537	0,6208	1,052	0,571	0,6788	1,073	0,604
0,3903	0,937	0,433	0,4482	0,972	0,469	0,5061	1,003	0,504	0,5640	1,029	0,538	0,6219	1,052	0,571	0,6798	1,074	0,605
0,3914	0,938	0,434	0,4493	0,973	0,470	0,5072	1,003	0,504	0,5651	1,029	0,538	0,6230	1,052	0,572	0,6809	1,074	0,606
0,3924	0,939	0,435	0,4503	0,973	0,470	0,5082	1,004	0,505	0,5662	1,030	0,539	0,6241	1,053	0,573	0,6820	1,075	0,606
0,3935	0,940	0,435	0,4514	0,974	0,471	0,5093	1,004	0,506	0,5672	1,030	0,539	0,6251	1,053	0,573	0,6830	1,075	0,607
0,3946	0,940	0,436	0,4525	0,974	0,471	0,5104	1,005	0,506	0,5683	1,030	0,540	0,6262	1,054	0,574	0,6841	1,075	0,608
0,3956	0,941	0,437	0,4536	0,975	0,472	0,5115	1,005	0,507	0,5694	1,031	0,541	0,6273	1,054	0,574	0,6852	1,076	0,608
0,3967	0,942	0,437	0,4546	0,976	0,473	0,5125	1,006	0,507	0,5704	1,031	0,541	0,6284	1,055	0,575	0,6863	1,076	0,609
0,3978	0,942	0,438	0,4557	0,976	0,473	0,5136	1,006	0,508	0,5715	1,032	0,542	0,6294	1,055	0,576	0,6873	1,076	0,610
0,3989	0,943	0,439	0,4568	0,977	0,474	0,5147	1,007	0,509	0,5726	1,032	0,543	0,6305	1,055	0,576	0,6884	1,077	0,610
0,3999	0,944	0,439	0,4578	0,977	0,475	0,5158	1,007	0,509	0,5737	1,033	0,543	0,6316	1,056	0,577	0,6895	1,077	0,611
0,4010	0,945	0,440	0,4589	0,978	0,475	0,5168	1,008	0,510	0,5747	1,033	0,544	0,6326	1,056	0,578	0,6906	1,077	0,612
0,4021	0,945	0,441	0,4600	0,978	0,476	0,5179	1,008	0,511	0,5758	1,034	0,544	0,6337	1,057	0,578	0,6916	1,078	0,612
0,4032	0,946	0,441	0,4611	0,979	0,477	0,5190	1,009	0,511	0,5769	1,034	0,545	0,6348	1,057	0,579	0,6927	1,078	0,613
0,4042	0,947	0,442	0,4621	0,980	0,477	0,5200	1,009	0,512	0,5780	1,035	0,546	0,6359	1,057	0,579	0,6938	1,079	0,613
0,4053	0,947	0,443	0,4632	0,980	0,478	0,5211	1,010	0,513	0,5790	1,035	0,546	0,6369	1,058	0,580	0,6948	1,079	0,614
0,4064	0,948	0,443	0,4643	0,981	0,479	0,5222	1,010	0,513	0,5801	1,036	0,547	0,6380	1,058	0,581	0,6959	1,079	0,615

Classifications des sols selon UIC.

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

ANNEXE H : Les épaisseurs minimales de la couche d'assise selon UIC719R

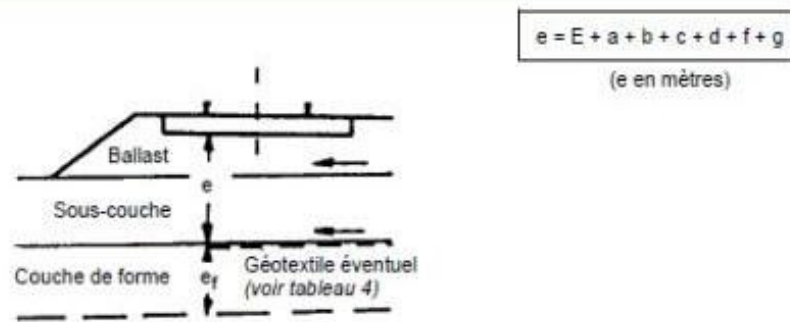


Fig. 9 - Calcul de l'épaisseur minimale "e" des couches d'assise

E	= 0,70 m	pour les plates-formes de classe de portance P1 ^a
E	= 0,55 m	pour les plates-formes de classe de portance P2 ^a
E	= 0,45 m	pour les plates-formes de classe de portance P3 ^a
a	= 0	pour les groupes UIC 1 et 2 (ou lignes à V > 160 km/h, quel que soit le groupe UIC) ^b
a	= - 0,05 m	pour les groupes UIC 3 et 4 ^b
a	= - 0,10 m	pour les groupes UIC 5 et 6 ^b
b	= 0	pour les traverses bois de longueur 2,60 m
b	= $\frac{2,50 - L}{2}$	pour les traverses béton de longueur L (b en m, L en m, b peut être négatif si L > 2,50 m)
c	= 0	pour un dimensionnement normal
c	= - 0,10 m	à titre exceptionnel pour des opérations difficiles sur les lignes existantes de groupe UIC autres que "7, 8, 9 sans voyageur" ^b
d	= 0	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 200 kN
d	= + 0,05 m	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 225 kN
d	= + 0,12 m	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 250 kN
f	= 0	pour toutes les lignes parcourues à V ≤ 160 km/h et pour les plates-formes de portance P3 des lignes parcourues à grande vitesse ^a
f	= + 0,05 m	pour les plates-formes de classe de portance P2 des lignes parcourues à grande vitesse ^a
f	= + 0,10 m	pour les plates-formes de classe de portance P1 des lignes parcourues à grande vitesse ^a
g	= +	géotextile lorsque la couche de forme est en sol QS1 ou QS2 ^c
g	= 0	(pas de géotextile) lorsque la couche de forme est en sol QS3 ^c

a. Les classes de portance des plates-formes sont définies au tableau 4.

b. Les groupes UIC sont définis dans la fiche n° 714 (édition du 01.01.89) (voir Bibliographie).

c. Les classes de qualité des sols sont définies au tableau 3.