

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

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

فرنسيس جانسون

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Francis Jeanson



Mémoire

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

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Infrastructures de Base

Thème

**Etude APD du tronçon KSAR EL BOUKHARI-
BOUGHEZOUL de la nouvelle ligne ferroviaire
BOUMEDFAA-DJELFA du (PK 0+000 au PK 15+000)
et la conception de la gare de KSAR EL BOUKHARI**

Présenté par :

FENNI Fadi

DEHBI Abderraouf

Encadré par :

Mr.LAIB Salah eddine

Mr.BENMOUCHIARA Salah eddine

Promotion 2025/2026

© ENSTP-FJ - Garidi - Vieux Kouba

Remerciements

Nous rendons grâce à Dieu pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'achèvement de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à l'ensemble des personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Nous exprimons particulièrement notre gratitude à toute l'équipe de l'ENSTP pour son accompagnement et son soutien tout au long de ce travail.

Nos remerciements les plus respectueux vont à Mme MAHIAOUI et M. FEDGHOUCHE ainsi qu'à M. MORSLI et M. RAMDANE pour leurs efforts et leurs conseils.

Nous remercions également l'administration du département d'infrastructures de base pour leur disponibilité et la qualité de leurs orientations.

Nous remercions sincèrement nos encadrants, M. S. LAIB et M. S. BENMOUCHIARA, pour leur suivi et accompagnement tout au long de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier les ingénieurs et responsables de COSIDER TP, SETIRAIL et ANESRIF pour avoir généreusement partagé leur expérience, notamment M. BAYOU, M. KHELIF, M. HENNI, M. DJAMEL, M. BILEL, M. ABDERRAHMANE, M. MUSTAPHA, M. SAADI, M. FARES, pour leur encadrement, leur assistance durant la période de stage.

Nous exprimons notre gratitude envers les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À ma chère mère, pour son amour, sa patience, ses sacrifices et son soutien tout au long de mes études. Merci pour ses prières et ses encouragements qui m'ont toujours donné la force, le courage et la motivation nécessaires pour avancer et persévérer dans les moments difficiles.

À la mémoire de mon cher père FENNI Ahmed, que Dieu lui accorde sa miséricorde et l'accueille dans son vaste paradis. Il restera toujours présent dans mon cœur, et ce travail est un hommage à ses sacrifices et aux valeurs qu'il m'a transmises.

À mes frères et sœurs, pour leur soutien, leur présence et leurs encouragements durant mon parcours.

À toute ma famille, pour leur aide et leur confiance.

À mes amis, notamment Abderraouf, Mahmoud et Chawki, pour leur soutien, leur fidélité et les bons moments partagés.

Et à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.

FENNI Fadi

إهداءات

(وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ ۖ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أَنِيبُ)

الحمد لله حمداً يوافي نعمه ويكافئ مزيده، حمداً يليق بجلال وجهه وعظيم سلطانه، الذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل المتواضع، فله الحمد أولاً وآخراً، وظاهراً وباطناً.

أهدي ثمرة هذا الجهد إلى والدتي الغالية، ينبوع الحنان والعطاء، التي كانت ولا تزال سندي في هذه الحياة. إليك أرفع أسمى آيات الشكر والعرفان، فقد كنت قدوتي في الصبر والتضحية والثبات، فجزاك الله عني خير الجزاء، وأدام عليك الصحة والعافية، ورزقك سعادة الدارين.

وإلى والدي العزيز، الذي كان دعمه ومساندته عوناً لي في مسيرتي العلمية. لقد تعلمت منك معنى الكفاح وتحمل المسؤولية، وكان تشجيعك لي دافعاً لتجاوز الصعاب وتخطي العقبات، فحفظك الله وأطال في عمرك، وجعل الجنة مثواك ومثوانا جميعاً.

وإلى أفراد عائلتي الكريمة وإخوتي الأعزاء: إلياس، وأنس، وأسماء، وعائشة، أتقدم إليكم بخالص الشكر والامتنان على ما قدمتموه من محبة ودعم متواصل. لقد كانت حياتي أكثر جمالاً بوجودكم، وكنتم خير عون وسند في مختلف مراحل دراستي.

وإلى زميلي فادي فني، أتوجه إليك بجزيل الشكر والتقدير على تعاونك وصبرك. أسأل الله أن يوفقك ويسدد خطاك.

كما لا يفوتني أن أتقدم بخالص الشكر إلى أصدقائي الأعزاء: شوقي ميكوي، محمود بوقطاية، إيهاب حمبلي، وليد جمل، عبد الرحيم محبوب، فايز بوزيان، رفيق بخوش عبد الهادي غنام، عصام شندرلي، جاب الله بلحواجب، حمو غمالي وعمي علي، الذين كانوا خير رفقة وأصدق عون. فجزاكم الله عني خير الجزاء ووفقكم في دروبكم.

وإلى الشيخ رشيد بوحويته، نسأل الله أن يجعل كل حرف علمتنا إياه نوراً لك يوم القيامة، وأن يثقل به ميزان حسناتك، فقد كانت تلاوتك الندية تبعث فينا الطمأنينة وتخفف عنا أعباء الطريق، وسيبقى صوتك العذب محفوراً في الذاكرة، فجزاك الله خير الجزاء.

كما أتقدم بجزيل الشكر والعرفان إلى أساتذة المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية، وإلى جميع عمال القطاع، على ما بذلوه من علم وتوجيه ومرافقة طيلة مشواري الدراسي، فجزاهم الله خير الجزاء.

وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين

ذهبي عبد الرؤوف

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى إنجاز دراسة تفصيلية من مستوى (A.P.D) لمقطع من خط السكة الحديدية الرابط بين بومدفع والجلفة، حيث يمتد هذا المقطع من النقطة الكيلومترية PK 0+000 إلى النقطة الكيلومترية PK 15+000، بطول إجمالي يقدر بـ 15 كيلومتراً، مع تهيئة محطة القصر البخاري.

يهدف المشروع إلى تعزيز الربط السككي بين الجلفة وبومدفع، وتحسين نقل المسافرين والبضائع، ودعم التنمية الاقتصادية الإقليمية، وقد أنجزت الدراسة وفق المعايير التقنية ومتطلبات السلامة لإدماجه مستقبلاً في الشبكة الوطنية للسكك الحديدية.

Résumé

Ce mémoire vise à réaliser une étude détaillée de niveau (A.P.D) d'un tronçon de la ligne ferroviaire reliant Boumedfaa à Djelfa. Ce tronçon s'étend du point kilométrique PK 0+000 au point kilométrique PK 15+000, sur une longueur totale estimée à 15 kilomètres, incluant l'aménagement de la gare de Ksar El Boukhari.

Le projet vise à renforcer la liaison ferroviaire entre Djelfa et Boumedfaa, à améliorer le transport des voyageurs et des marchandises, et à soutenir le développement économique régional. L'étude a été réalisée conformément aux normes techniques et aux exigences de sécurité, en vue de son intégration future au réseau ferroviaire national.

Abstract

This thesis aims to carry out a detailed (A.P.D) study of a section of the railway line connecting Boumedfaa and Djelfa. This section extends from kilometer point PK 0+000 to PK 15+000, with a total estimated length of 15 kilometers, including the development of Ksar El Boukhari station.

The project aims to strengthen the railway connection between Djelfa and Boumedfaa, improve passenger and freight transport, and support regional economic development. The study was conducted in accordance with technical standards and safety requirements, with a view to its future integration into the national railway network.

Table de matière

Introduction générale :	1
.....	2
I. Généralités :	3
I.1. Introduction sur le chemin de fer :	3
I.2. Composition d'une ligne ferroviaire :	3
I.3. La voie ferrée :	3
I.3.1. L'infrastructure :	3
I.3.2. La superstructure :	4
I.4. Le soudage des rails et le principe du LRS :	6
I.4.1. Les méthodes de soudage :	7
I.4.1.1. Le soudage aluminothermique :	7
I.4.1.2. Le soudage électrique :	7
I.5. Les appareils de voies :	8
I.6. Conclusion :	10
II. Présentation de projet :	11
II.1.1. Introduction :	11
II.1.2. Description du projet :	11
II.2. Localisation du projet de fin d'études :	12
II.3. Présentation de Ksar El Boukhari :	12
II.3.1. Ksar El Boukhari :	12
II.3.2. Relief :	13
II.3.3. Climatologie :	13
II.3.4. Objectifs du projet :	13
II.3.5. Les paramètres de conception du projet :	14
II.3.6. Justificatif du choix de double voie :	14
II.4. Conclusion :	14
III. Géométrie de la voie :	15
III.1 Introduction :	15
III.2 Tracé en plan :	15
III.2.1. Conditions à respecter dans le tracé en plan :	15
III.2.2 Les éléments du tracé en plan :	15
III.2.3. Paramètres géométriques de la voie :	16
III.2.4. Dévers :	16

III.2.4.1. Dévers maximal :	16
.III.2.4.2 Dévers théorique ou d'équilibre Dth :	16
III.2.4.3. Insuffisance de devers :	17
III.2.4.4. Excès de dévers E :	17
III.2.4.5. Variation de dévers en fonction de la longueur $\Delta d/\Delta L$:	18
.III.2.5 Raccordements progressifs	18
III.2.6. Application sur le projet.....	18
III.2.6.1. Rayon minimum en plan Rmin.....	19
.III.3 Profil en long :	20
.III.3.1 Les éléments du profil en long :	21
.III.3.1.1 Les alignements droits :	21
III.3.1.2. Les cercles :	22
III.3.1.3. Coordination entre le profil en long et le tracé en plan :	22
III.4. Conclusion :	22
IV. Etude de contraintes :	23
IV.1. Introduction :	23
IV.2. Les contraintes :	23
IV.2.1. Les différents réseaux existants :	23
IV.2.2. Les rétablissements routiers :	24
IV.2.3. Les bâtis :	25
IV.3. Visualisation des contraintes du tracé :	26
IV.4. Conclusion :	29
V. Étude hydrologique et hydraulique :	30
.V.1 Introduction :	30
V.2. Description générale :	30
V.3. Etude hydrologique :	30
V.4. Climatologie. Aspects Générales :	31
V.4.1. Pluviométrie Moyenne :	31
V.4.2. Températures :	32
V.4.3. Ensoleillement :	32
V.4.4. Evaporation et Evapotranspiration :	32
V.5. Climat. Température et Pluies en Ksar el Boukhari et Boughezoul	33
V.6. Donnée pluviométrique :	34
V.6.1. Pluies annuelles.....	34

.V.6.2 Pluies journalières :	34
V.6.3. Analyse des valeurs. Lectures des stations pour obtenir Pluies Journalières Maximales Annuelles et Pluies Annuelles :	34
V.7. Caractérisation des bassins versants :	35
.V.7.1 Délimitation du bassin versant :	35
V.7.2. Calcul du temps de concentration (T_c) :	37
V.7.3. Calcul des débits maximaux (Les crues) :	40
V.7.4. La méthode rationnelle :	40
.V.7.5 La formule de Transition :	42
.V.7.6 La formule de MALLET ET GAUTHIER :	42
V.8. Étude hydraulique :	45
V.8.1. Méthode de Manning-Strickler :	45
V.8.2. Dimensionnement des ouvrages transversaux :	45
V.8.2.1. Dimensionnement des buses :	45
V.8.2.2. Dimensionnement des dalots :	47
V.8.2.3. Les ouvrages d'art :	51
V.8.3. Dimensionnement des ouvrages longitudinaux :	51
V.8.3.1. Dimensionnement des fossés :	52
V.9. Conclusion :	54
VI. Etude géologique et géotechnique :	55
VI.1. Introduction :	55
VI.2. Étude géologique :	55
VI.2.1. Le cadre géologique général :	55
VI.2.2. Stratigraphie régionale :	56
VI.2.3. Tectonique :	56
VI.2.3.1. Sismicité de la région :	57
VI.2.4. Géomorphologie :	57
VI.2.5. Hydrogéologie :	57
VI.2.6. Division géologique du tracé :	57
VI.2.7. Lithologies touchées par le tracé de la voie ferrée :	59
VI.3. Etude géotechnique :	60
VI.3.1. Travaux de reconnaissance :	60
VI.3.1.1. Reconnaissance in-situ :	60
VI.3.1.2. Reconnaissance au laboratoire :	61

VI.3.2. Synthèse des résultats géotechniques :	62
VI.3.2.1. Interprétation des résultats :	67
VI.3.2.2. Agressivité du sol :	67
VI.3.3. Gites d'empruntes et carrière :	67
VI.4. Vérification de stabilité des talus vis-à-vis le glissement :	72
VI.4.1. Cas de déblai :	72
VI.4.2. Cas de remblai :	73
VI.5. Conclusion :	73
VII. Assise ferroviaire :	74
VII.1. Introduction :	74
VII.2. Différentes couches d'assises :	74
.VII.2.1 Le ballast :	74
VII.2.2. Sous couche :	74
VII.2.3. La plate-forme :	75
.VII.3 Classification des sols pour la plate-forme :	75
VII.4. Qualité et classe de Plate-forme :	75
VII.5. Méthode de dimensionnement adoptée :	76
VII.6. Calcul d'épaisseur minimal d'après la fiche UIC 719 R :	76
VII.7. Conclusion :	78
VIII. Profil en travers :	79
VIII.1. Introduction :	79
VIII.2. Les éléments du profil en travers :	79
VIII.2.1. Les éléments de superstructure	79
VIII.2.2. Les éléments de l'infrastructure :	79
VIII.2.3. Les éléments du talus :	79
VIII.2.4. Les éléments d'assainissement.....	79
VIII.3. Profile en travers type du projet :	79
VIII.4. Calcul des cubatures :	80
VIII.5. Conclusion :	80
IX. Terrassement et ouvrages :	81
IX.1. Introduction :	81
IX.2. Les terrassements :	81
IX.3. Objectifs et enjeux des terrassements :	81
IX.4. Pente des talus en déblai et en remblai :	81

IX.5. Les bermes :	82
IX.6. Protection des talus :	82
IX.7. Le compactage :	82
IX.8. Réutilisation des matériaux excavés :	83
IX.9. Méthode d'excavation :	83
IX.10. Les ouvrages et leurs choix :	83
IX.11. Modélisation des ouvrages d'art en 3D par le BIM :	84
IX.12. Conclusion :	87
X. Conception de la gare :	88
X.1. Introduction :	88
X.2. Différents types de gares :	88
X.3. Le plan de masse d'une gare :	88
X.4. Conditions et hypothèses de conception de la gare de voyageurs :	89
X.5. Détails sur la gare de voyageurs de Ksar El Boukhari :	89
X.6. Caractéristiques de la gare :	90
X.6.1. Déclivité :	90
X.6.2. Appareil de voie :	90
X.6.3. Garage franc :	90
X.6.4. Longueur utile :	91
X.6.5. Les heurtoirs :	91
X.7. Assainissement longitudinale de la gare :	91
X.8. Schéma de la gare de Ksar El Boukhari :	92
X.9. Conclusion :	92
XI. Signalisation ferroviaire :	93
XI.1 Introduction :	93
XI.2 Le rôle des installations de signalisation :	93
XI.3. Les risques ferroviaires :	93
XI.4. Implantation longitudinale :	94
XI.5. Les signaux ferroviaires :	94
XI.6. Principe de base de cantonnement :	96
XI.7. Les types de blocs :	96
XI.7.1. Bloc manuel (B.M) :	96
XI.7.2. Bloc automatique à permissivité limitée (B.A.P.R) :	96
XI.7.3. Bloc automatique lumineux (B.A.L) :	97
XI.8. Système de contrôle et de protection ERTMS :	97

.XI.9 Application sur notre projet :	98
XI.10. Conclusion :	98
XII. Etude d'impact sur l'environnement :	99
XII.1. Introduction :	99
XII.2. Cadre législatif et réglementaire des études d'impact sur l'environnement :	99
XII.3. Éléments à prendre en compte lors de l'étude d'impact :	100
XII.3.1. Réglementation relative au bruit et aux émissions dans l'atmosphère :	100
XII.3.2. Déclaration d'Utilité Publique, processus d'indemnisation et mesures compensatoires :	100
XII.4. Description de la zone d'étude :	100
XII.5. Description de l'état initial de la zone d'étude et de son environnement :	100
XII.5.1. Description du milieu physique :	101
XII.5.1.1. Contexte géographique :	101
XII.5.1.2. Contexte géologique :	101
XII.5.1.3. Contexte hydrogéologique :	101
XII.5.1.4. Contexte hydrologique :	101
XII.5.1.5. Climatologie :	101
XII.5.2. Description du milieu naturel :	101
XII.5.3. Description du milieu socio-économique :	102
XII.6. Evaluation des impacts prévisibles :	103
XII.7. Conclusion :	107
XIII. Devis quantitatif et estimatif :	108
XIII.1. Introduction :	108
XIII.2. Application au projet :	108
XIII.3. Conclusion :	109
XIV. Planification de projet :	110
XIV.1. Introduction :	110
XIV.2. Les objectifs de la planification :	110
XIV.3. Le diagramme de Gantt :	110
XIV.4. Application sur le projet :	111
XIV.5. Conclusion :	111
Conclusion générale :	112

Liste des tableaux

Tableau III.1 Vitesse des trains adoptées pour le projet :	16
Tableau III.2 Limite de devers normal/exceptionnel :	16
Tableau III.3 la limite de l'insuffisance de devers :	17
Tableau III.4 – la limite de l'excès de dévers :	17
Tableau III.5 Valeurs limite de la variation de dévers en fonction de la longueur :	18
Tableau III.6 Tableau récapitulatif des paramètres du tracé :	20
Tableau III.7 Valeurs limite de la longueur de déclivité maximale admissible :	21
Tableau III.8 Valeurs limite de la longueur minimale des pentes ou des /rampes :	22
Tableau III.9 Valeurs limite de la longueur minimale des rayons des raccordements :	22
Tableau IV-1 Les réseaux existants :	23
Tableau IV-2 Les routes croisées par le tracé projeté :	25
Tableau IV-3 Les bâtis traversés par le tracé projeté	26
Tableau V.1 Température moyenne pour la région en analyse :	32
Tableau V.2 Durées moyennes d'ensoleillement pour la région en analyse :	32
Tableau V- 3 : Stations pluviométriques :	34
Tableau V- 4 : Pluies Journalières Maximales Annuelles et Pluies Annuelles. Distribution statistique :	35
Tableau V-5 : Caractéristiques morphométriques des bassins versants :	38
Tableau V-6 : Valeur de C1 :	41
Tableau V-7 : Valeur de C2 :	41
Tableau V-8 : Valeur de C3 :	41
Tableau V-9 : Valeurs de (a) pour les différentes fréquences :	42
Tableau V-10 : Le débits maximaux centennaux et les intensités de pluie centennales :	43
Tableau V- 11 : Dimensionnement des buses :	49
Tableau V-12 : Dimensionnement des dalots :	50
Tableau V-13 : Implantation des OA traversant certains parcours hydrauliques :	51
Tableau V-14 : Débit à évacuer par le fossé :	53
Tableau V- 15 : Dimensionnement du faussé type 3 :	54
Tableau VI-1 : Résultats des essais de pénétromètre dynamique (PDL) :	61
Tableau VI-2 : Résultats géotechnique sur les puits de reconnaissance :	63
Tableau VI-3 : Résultats géotechnique sur les sondages carottées :	64

Tableau VI-4 : Résultats géotechniques complémentaires sur certains sondages et puits.....	66
Tableau VI-5 : Localisation et volumes d'exploitation des emprunts :	69
Tableau VI-6 : Résultats d'essais au laboratoire sur les matériaux des carrières :	70
Tableau VI-7 : Coordonnées et situation des carrières proche du tracé :	71
Tableau VI-8 : Résultats d'analyse de stabilité des talus les plus critiques :	73
Tableau VII-1 : Détermination de la classe de portance de la plate-forme :	76
Tableau VII-2 : Épaisseurs des composants de la structure d'assise :	77
Tableau VIII-1 : Les volumes des différentes couches :	80
Tableau IX-1 : Récapitulatif des ouvrages d'art :	84
Tableau XI-1 : Les risques ferroviaires :	93
Tableau XI-2 : Les signaux ferroviaires :	94
Tableau XII-1 : Évaluation des impacts environnementaux produits par le projet :	104
Tableau XIII-1 : Devis quantitatif et estimatif :	108

Listes des figures

Figure 1 : Carte Réseaux Ferré National :	1
Figure 2 : Pénétrante Centre :	2
Figure I-1 : Traverses bibloc :	4
Figure I-2 : Traverses monobloc :	5
Figure I-3 : Traverses en bois :	5
Figure I-4 : Rail à double champignon :	6
Figure I-5 : Rail Vignole :	6
Figure I-6 : Le soudage aluminothermique :	7
Figure I-7 : Machine de soudage des rails par étincelage :	7
Figure I- 8 : L'attache de type NABLA :	8
Figure I-9 : L'attache de type Vossloh :	8
Figure I-10 : Schéma d'un branchement simple :	9
Figure I-11 : Conception d'appareille de voie UIC 60 1/9-190 :	10
Figure II-1 : Vue en plan prise par Google earth :	11
Figure II -2 : schéma de principe de partage des lots :	12
Figure II-3 : Carte topographique :	13
Figure III-1 : Les éléments du tracé en plan :	15
Figure IV-1 : Zone de future gare de Ksar El Boukhari :	26
Figure IV-2 : Franchissement de A1 et oued Chélif :	27
Figure IV-3 : Franchissement d'oued Chélif, 3 routes et des habitations	27
Figure IV-4 : Passage inférieure (rétablissement routier) :	28
Figure IV-5 : Passage inférieur (route A1) :	28
Figure IV-6 : Franchissement de piste, bâtis :	29
Figure V-1 : Carte de situation de la région d'étude :	31
Figure V-2 : Carte pluviométrique du nord de l'Algérie :	31
Figure V-3 : Localisation de l'ouvre sur la carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie :	32
Figure V-4 : Pluie et température moyenne en Ksar El Boukhari :	33
Figure V-5 : Pluie et température moyenne en Boughezoul :	33
Figure V-6 : Exemples de Bassin versant / Crête / Thalweg / Vallée :	36
Figure V-7 : La délimitation des bassins versants sur les cartes d'état-major :	36
Figure V-8 : Exemple de délimitation des bassins versants avec google earth :	37
Figure V-9 : Ouvrage hydraulique (buse) :	45
Figure V-10 : Ouvrage hydraulique (dalot) :	46

Figure V- 9 : Fossé type 3 :	52
Figure VI – 1 : Grands traits géologiques de l’Algérie :	55
Figure VI – 2 : Carte tectonique de l’Algérie du nord :	56
Figure VI – 3 : Zonage sismique de l’Algérie :	57
Figure VI – 4 : Plan géologique et géotechnique (Ech : 1/25.000) :	58
Figure VI - 5 : Colonne stratigraphique des lithologies touchées par le tracé :	59
Figure VI – 6 : Sondage carotté SC-11 au PK 14+286 (0.00m - 15.00m) :	62
Figure VII-1 : Calcul de l’épaisseur minimale "e" des couches d’assise :	77
Figure IX-1 : Viaduc 1 traversant l’autoroute nord sud A1 :	85
Figure IX-2 : Viaduc 2 traversant oued Chélif :	85
Figure IX-3 : Viaduc 3 traversant la ville de Ksar El Boukhari :	86
Figure IX-4 : Viaduc 3 en PRS :	86
Figure IX-5 : Rétablissement routier (pont cadre) :	87
Figure IX-6 : Viaduc 7 traversant l’autoroute A1 :	87
Figure X-1 : Schéma d’un garage franc :	90
Figure X-2 : Schéma de la longueur utile :	91
Figure X-3 : Schéma de la gare de Ksar El Boukhari :	92
Figure XI-2 : Le système de cantonnement :	96
Figure XI-2 : le système de contrôle des trains ERTMS :	97

Abréviations

PK : Point Kilométrique

UIC : Union Internationale des Chemins de fer

SNTF : Société Nationale des Transports Ferroviaires

APD : Avant-projet détaillé

RN : Route Nationale

LRS : Long Rail Soudé

ADV : Appareil De Voie

Vvoy : Vitesse des trains de voyageurs

Vmar : Vitesse des trains des marchandises

BV : Bassin versant

Qps : Débit pleine section

Vps : Vitesse pleine section

SC : Sondage Carotté

PR : Puit de Reconnaissance

PDL : Pénétrromètre Dynamique Lourd

GF : Garage Franc

LU : Longueur Utile

NA : Norme Algérienne

SNCF : Société Nationale des Chemins de fer Français

LRP : Longueur de Raccordement Progressif

OA : Ouvrage d'Art

OH : Ouvrage Hydraulique

ERTMS : Européen Railways Traffic Management System

RPA : Règles Parasismique Algériens

TN : Terrain Naturel

CW : Chemin de Wilaya

ANESRIE : Agence Nationale d'Etudes et de Suivis de la Réalisation des Investissements Ferroviaires

SETIRAIL : Société d'Etudes Techniques et de l'Ingénierie du RAIL

Introduction générale :

Depuis le 19e siècle, les voies ferrées ont transformé le transport terrestre en reliant villes, régions et pays. Grâce à une faible résistance au roulement, le transport ferroviaire permet de déplacer de lourdes charges avec une grande efficacité énergétique, un haut niveau de sécurité et une forte capacité. Il se distingue également par des coûts d'infrastructure plus réduits que la route, une faible pollution et une consommation de carburant nettement inférieure à celle du transport routier lourd.



Figure 1 Carte Réseaux Ferré National

La photo présente une vue d'ensemble du réseau ferroviaire national en Algérie, ainsi que les différents projets de développement en cours et programmés. La carte centrale met en évidence les lignes existantes, les lignes en cours de réalisation et celles en phase d'étude, reflétant la stratégie d'extension du réseau vers les régions du Sud afin d'assurer le désenclavement et de renforcer la cohésion territoriale.

Les images entourant la carte représentent les principales composantes du système ferroviaire, telles que les travaux de réalisation de la voie, les ouvrages d'art (ponts et tunnels), les gares modernes, les trains électriques et les équipements de signalisation. Elles illustrent les efforts déployés pour moderniser les infrastructures ferroviaires et améliorer la performance du transport des voyageurs et des marchandises.

Cette illustration met en évidence le rôle stratégique du chemin de fer en tant que levier de développement économique, d'intégration régionale et de mobilité durable.

Il s'agit d'une ligne de chemin de fer transsaharienne, reliant Alger à Tamanrasset en passant par Médéa, Djelfa, Laghouat, Ghardaïa et In Salah sur une distance de 2039 km, avec des trains atteignant une vitesse de 220 km/h. Dans le cadre de la concrétisation de cette ligne importante, l'agence nationale d'études et de suivi de la réalisation des investissements ferroviaires (ANESRIF) a récemment mis en service le tronçon reliant Boughezoul à Laghouat en passant par Ain Ouassara, Hassi Bahbah, Djelfa et Sidi Makhlouf, tandis que les études se poursuivent dans les autres sections.

De cette ligne, deux branches se détachent : la première s'étend vers l'est de Laghouat à Tamanrasset, tandis que la seconde se dirige vers l'ouest de Ghardaïa à Béchar.

Traverse dix (10) wilayas (plus de sept millions d'habitants, représentant environ 18 % de la population)

Comprend 2039 km dont :

250 km : ligne exploitée.

639 km : Etudes finalisées.

1050 km : Etudes en cours.



Figure 2 Pénétrante Centre

Chapitre I : Généralités

I. Généralités :

I.1. Introduction sur le chemin de fer :

De manière générale, le chemin de fer désigne un système de transport guidé constitué de voies ferrées équipées de rails, sur lesquelles circulent des trains tractés par des locomotives.

Le transport ferroviaire est un service public destiné à répondre aux besoins de mobilité des populations ainsi qu'aux exigences logistiques des activités industrielles et économiques. Il constitue un système de transport collectif guidé permettant l'acheminement des voyageurs et des marchandises dans des conditions de sécurité, de régularité et de capacité élevées.

Face à l'augmentation du trafic routier et à la congestion des grandes agglomérations, le chemin de fer représente une alternative efficace à la voiture individuelle et au transport routier de marchandises. Grâce à sa capacité élevée, sa fiabilité et son impact environnemental relativement réduit, il demeure l'un des modes de transport terrestre dominants dans de nombreux pays.

I.2. Composition d'une ligne ferroviaire :

Une ligne ferroviaire est une infrastructure linéaire reliant deux ou plusieurs régions et permettant la circulation des trains dans des conditions de sécurité et d'exploitation définies.

Une ligne ferroviaire comprend :

- ✚ La voie ferrée.
- ✚ Les ouvrages d'art comme les ponts, viaducs et les tunnels.
- ✚ Les équipements ferroviaires de signalisation, télécommunication, et d'alimentation électrique.
- ✚ Les installations fixes d'exploitation telles que les gares, les quais, les bâtiments, les dépôts, etc.

I.3. La voie ferrée :

La voie ferrée est l'ensemble des éléments structurels (infrastructure et superstructure) assurant le guidage, le support et la transmission des charges des trains vers le sol.

I.3.1. L'infrastructure :

L'infrastructure ferroviaire constitue la partie inférieure de la voie ferrée. Elle assure le support, la stabilité et la transmission des charges vers le sol naturel.

Elle comprend principalement :

✚ La plateforme ferroviaire :

Surface aménagée recevant la voie ferrée. Elle résulte des travaux de terrassement (déblais et remblais).

✚ Les terrassements :

Ensemble des travaux permettant d'adapter le terrain naturel au tracé projeté ils comprennent : Les déblais, les remblais, le nivellement et le compactage.

La couche de forme :

Couche intermédiaire placée au-dessus du sol support afin d'améliorer la portance et d'assurer une meilleure répartition des charges.

Les dispositifs d'assainissement :

Systèmes destinés à évacuer les eaux (fossés, drains, caniveaux) afin d'éviter la dégradation de la plateforme.

Les ouvrages d'art liés à l'infrastructure :

Ouvrages assurant la continuité de la ligne (ponts, viaducs, tunnels, murs de soutènement, dalots).

I.3.2. La superstructure :

La superstructure de la voie ferrée constitue l'ensemble des éléments supérieurs de la voie, destinés à supporter et à transmettre les charges des trains. Elle comprend deux files de rails en acier, dont l'écartement et l'inclinaison sont assurés par les traverses disposées régulièrement le long de la voie. Ces traverses reposent sur le ballast, qui garantit la stabilité, l'absorption des vibrations et le drainage de la voie. Les rails sont maintenus aux traverses par des attaches robustes, tandis que les appareils de voie permettent la jonction et le changement de direction entre différentes voies, assurant ainsi la continuité et la flexibilité du réseau ferroviaire.

La superstructure comprend :

Le ballast :

Couche de granulats placée sous les traverses. Elle répartit les charges des trains, assure la stabilité des rails, facilite le drainage des eaux et absorbe les vibrations.

Les traverses :

Pièces de bois, béton ou métal posées sous les rails pour maintenir leurs écartements et pour assurer la stabilité de la voie ferrée et la transmission des charges.

On distingue deux types de traverses en béton :

▪ Les traverses bibloc :

Constituées de deux blocs de béton (blochets) reliés par une entretoise métallique centrale (cornière).



Figure I-1 Traverses bibloc

- Les traverses monobloc :

Fabriquées en un seul bloc de béton, généralement précontraint par des torons d'acier tendus, ce qui leur confère une excellente résistance.



Figure I-2 Traverses monobloc

- Les traverses en bois :

Utilisé beaucoup plus dans le passé et leur utilisation a diminué à cause de leur coût élevé et leur durée de vie plus courte en comparant avec les autres types, elles sont utilisées maintenant dans les appareils de voies.



Figure I-3 Traverses en bois

- Les rails

Le rail représente l'organe principal de la voie ferrée, puisqu'il assure le déplacement des trains tout en garantissant leur guidage. Il constitue l'élément directement sollicité par les charges du matériel roulant. La performance et la résistance du rail dépendent essentiellement de son poids par unité de longueur, qui influence sa rigidité et sa capacité à supporter les efforts appliqués.

Les rails sont généralement fabriqués en barres de longueur normalisée, le plus souvent 18 m ou 36 m, avant d'être assemblés ou soudés pour assurer la continuité de la voie.

Ils se distinguent principalement par :

- Leur forme ou profil transversal.
- La qualité et la nuance de l'acier employé dans leur fabrication.

Ils existent différents types de rail. On distingue notamment :

▪ **Les rails à double champignon :**

C'est un ancien type de rail dont la section présente deux parties symétriques, l'une servant de surface de roulement et l'autre destinée à permettre un éventuel retournement du rail en cas d'usure.

▪ **Les rails à patin de type Vignole :**

C'est le type le plus utilisé dans les réseaux ferroviaires actuels, caractérisé par une base large posée directement sur les traverses, une âme et un champignon



Figure I-4 Rail à double champignon



Figure I-5 Rail Vignole

I.4. Le soudage des rails et le principe du LRS :

Le Long Rail Soudé (LRS) est obtenu par le soudage bout à bout de rails de longueurs standards (généralement 18 m ou 36 m) à l'aide de procédés tels que le soudage aluminothermique ou électrique, afin de constituer une file continue supprimant les joints traditionnels, ce qui améliore le confort de roulement, réduit les chocs et diminue les besoins de maintenance, toutefois, en raison de cette continuité, les rails ne peuvent plus se dilater librement sous l'effet des variations de température, d'où la nécessité d'une opération de libération des contraintes consistant à ajuster la longueur du rail et à le fixer à une température dite de neutralisation, afin de maîtriser les efforts thermiques de traction en période froide et de compression en période chaude et d'assurer ainsi la stabilité et la sécurité de la voie.

I.4.1. Les méthodes de soudage :

I.4.1.1. Le soudage aluminothermique :

Le soudage aluminothermique est un procédé permettant d'assembler des rails directement sur chantier en utilisant la réaction chimique entre l'aluminium et l'oxyde de fer pour produire de l'acier en fusion. Ce métal en fusion est coulé dans un moule placé autour des extrémités des rails, assurant ainsi leur liaison solide et continue. Ce procédé est simple à mettre en œuvre, nécessite peu de personnel qualifié et permet une remise en service rapide de la voie, ce qui le rend particulièrement adapté aux travaux de réparation ou aux jonctions de longs rails soudés (LRS).



Figure I-6 Le soudage aluminothermique

I.4.1.2. Le soudage électrique :

Le soudage électrique, ou soudage à l'arc, est un procédé utilisé pour assembler les rails de chemin de fer en créant des joints solides et durables, garantissant la stabilité et la sécurité de la voie. Cette technique est largement employée en Algérie et dans le monde pour la construction et la maintenance des réseaux ferroviaires. Les joints de rails restent toutefois nécessaires dans les gares et les courbes horizontales serrées, où l'installation de LRS n'est pas possible.



Figure I-7 Machine de soudage des rails par étincelage

 Le système d'attache :

Le système d'attache maintien l'écartement des rails en les fixant sur les traverses, Il existe plusieurs types et technique d'attache, selon le type de traverses.

L'attache de type **NABLA** est la plus utilisé est constituée par un crapaud (lame-ressort) maintenu par un écrou (tirefond) vissé sur une tige filetée dans des encoches accrochées dans le blochet.



Figure I- 8 L'attache de type NABLA

L'attache de type **Vossloh** est un dispositif de fixation de rail dit à ressort, il est conçu pour amortir les vibrations et maintenir l'écartement des rails, il est facile a monté et performant.



Figure I-9 L'attache de type Vossloh

I.5. Les appareils de voies :

Des branchements à commande automatique ou manuelle sont implanter pour passer d'une voie à une autre, ils sont caractérisés par leur angle de déviation au cœur. L'appareil de voie ne peut pas être posés en dévers et aucun raccordement en courbe n'étant possible pour la voie déviée leur rayon minimum est déterminé en fonction de la vitesse, ce dernier est constitué de rails spéciaux (croisement de rail) et d'éléments mobiles (aiguille).

Les appareils de voie (ADV) sont appelés aiguillage et il existe trois catégories d'aiguilles :

- Le branchement simple.
- Le croisement ou traversée simple
- La traversée jonction simple ou double

Ci-dessous un schéma d'un branchement simple avec les éléments suivants :

- 1- L'aiguille ou la « lame » constitue la partie mobile du mécanisme d'aiguillage.
- 2- L'élément fixe de la voie (du rail), contre laquelle la lame mobile va venir se plaquer.
- 3- Une tige, appelée « tringle » vient connecter les deux aiguilles (ou lames).
- 4- Un moteur d'aiguillage fait coulisser la tringle et les aiguilles.
- 5- Le cœur de l'aiguillage que les voies convergent.
- 6- Contre-rail est l'élément qui guide et assure la stabilité des essieux du train à son passage.

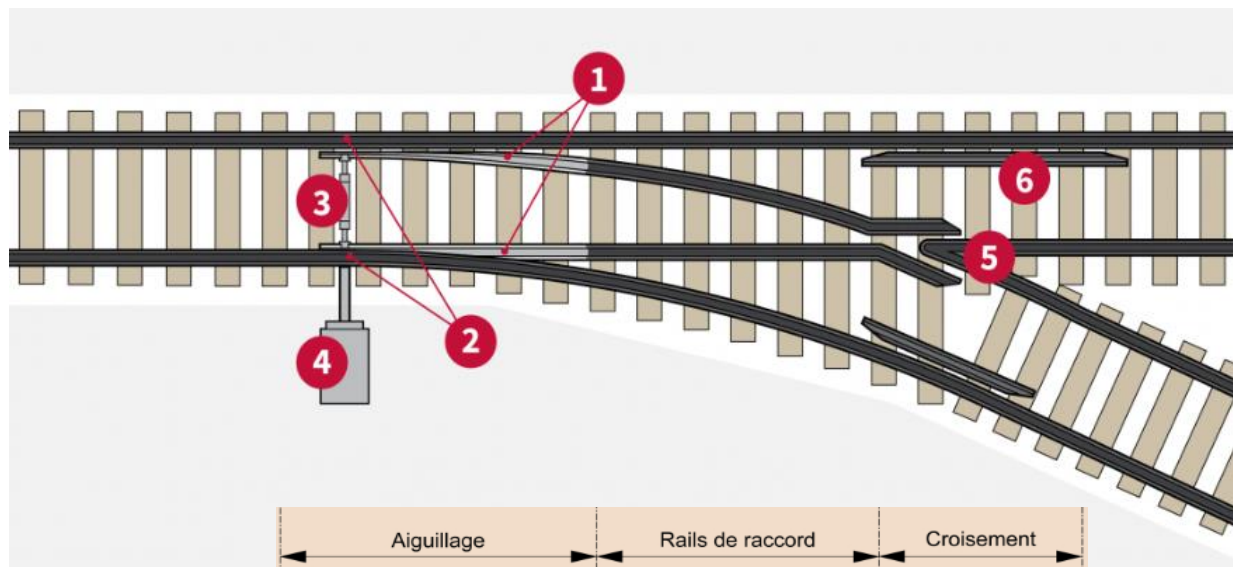


Figure I-10 Schéma d'un branchement simple

✚ Exemple d'appareil de voie :

UIC 60 1/9-190 : c'est-à-dire que la tangente de l'angle de l'appareil $\tan \alpha = 1/9$, avec une vitesse de franchissement **40 km/h** avec un rayon de **190m** utilisé dans le cas d'un passage de voie principale a une voie de service ou de stationnement.

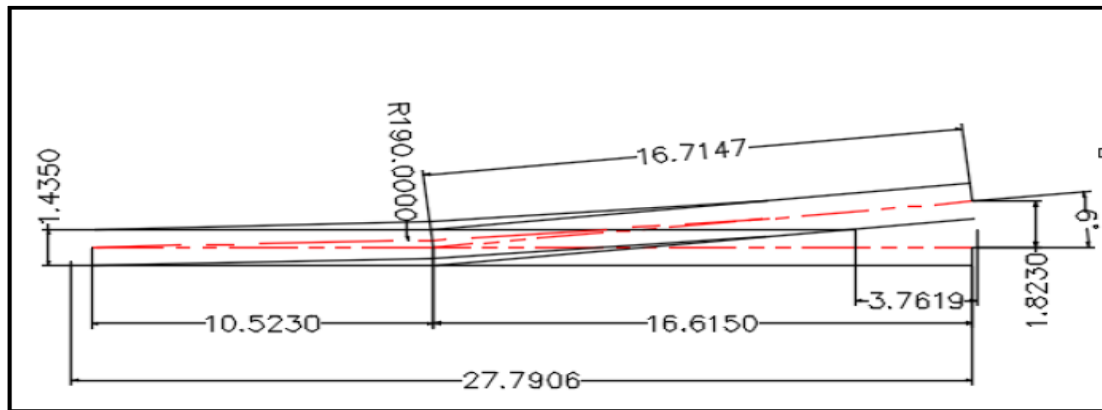


Figure I-11 Conception d'appareille de voie UIC 60 1/9-190

I.6. Conclusion :

Ce chapitre décrit les principales caractéristiques et catégories de la voie ferrée, ainsi que ses éléments constitutifs, comprenant les rails et leur assemblage, les traverses, les systèmes de fixation et les appareils de voie.

Chapitre II : Présentation de projet

II. Présentation de projet :

II.1.1. Introduction :

Le chemin de fer est un moyen essentiel pour désenclaver les régions et renforcer le développement du pays. Son progrès passe par la modernisation des lignes existantes et l'extension du réseau vers de nouvelles zones.

En Algérie, l'État accorde une grande importance au secteur des transports, car il soutient la croissance économique. Le transport facilite la circulation des personnes et des marchandises, encourage les échanges et contribue à rapprocher les régions et à réduire les inégalités.

Dans le cadre du développement du réseau ferroviaire d'Algérie parmi lesquels la réalisation de pénétrante centre reliant le sud au nord du pays.

II.1.2. Description du projet :

Le projet vise à relier la ville de Ksar El Boukhari avec la ligne existante des hautes plateaux (ligne Ouest Tissimsilte – Boughezoul, la ligne Est Boughezoul – M'Sila et la ligne Sud Boughezoul – Laghouat) qui sont tous liés à la gare centrale de Boughezoul.

Cette section faite partie de la ligne de Boumedfaa – Djelfa, en passant par la ville de Ksar El Boukhari et de Boughezoul sur **41 Km** d'environ du **Pk 00+000** au **Pk 40+995**, c'est une nouvelle ligne ferroviaire pour le transport mixte (voyageur, marchandise)



Figure II-1 Vue en plan prise par Google

La ligne est partagée en deux Lots comme suit :

- ✚ Lot 01 du Pk 00+000 au Pk 20+000 :
 - Lot 01 Section A du PK 00+000 au Pk 10+000
 - Lot 01 Section B du PK 10+000 au Pk 20+000
- ✚ Lot 02 du Pk 20+000 au Pk 40+000 :
 - Lot 02 Section A du PK 20+000 au Pk 30+000
 - Lot 02 Section B du PK 30+000 au Pk 40+000 (voie figure ci-dessous)

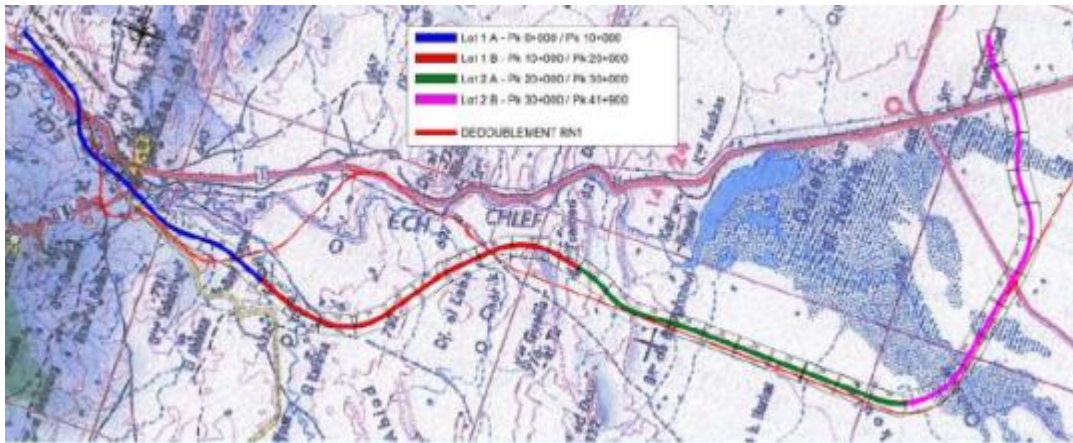


Figure II -2 schéma de principe de partage des lots

➤ Marché travaux :

Le marché est confié au groupement d'entreprises publics dénommé **GRBK**, composé de :

- ✚ **COSIDER TP** (Chef de file) : pour les terrassements, drainage, VRD et 50% de partie voie.
- ✚ **COSIDER OA- SAPTA et SEROR** : pour les ouvrages d'art.
- ✚ **INFRARAIL** : pour la partie voie (50%)

➤ Marché contrôle et suivis :

Le marché est confié au groupement de bureaux d'études publiques dénommé **PBK**, composé de :

- ✚ **SETIRAIL** (Chef de file)
- ✚ **SAETI**
- ✚ **SIDEM**

Le délai prévisionnel d'achèvement des travaux : 05/02/2027

II.2. Localisation du projet de fin d'études :

Notre projet de fin d'études consiste à faire une étude **APD** concernant un tronçon du **lot 1 section A** du **PK 0+000** au **PK 15+000** sur **15 Km** dans la région de Ksar El Boukhari avec l'aménagement de la gare dans cette région au **PK 0+000**.

II.3. Présentation de Ksar El Boukhari :

II.3.1. Ksar El Boukhari :

Ksar El Boukhari a été promue au rang de wilaya à part entière (wilaya n°67) en novembre 2025, faisant partie des 11 nouvelles wilayas créées pour renforcer le développement local. Auparavant une daïra de la wilaya de Médéa, cette ville est située à 135 Km au sud d'Alger, et située à 64 Km au sud de Médéa. La commune de Ksar El Boukhari compte environ 70000

habitants (estimations récentes basées sur l'expansion urbaine), tandis que l'agglomération urbaine était déjà évaluée à plus de 52000 habitants il y a quelques années. À l'échelle communale, la ville centre de Ksar El Boukhari s'étend sur une superficie d'environ 54 km². À l'échelle de la wilaya, le territoire de la nouvelle wilaya, qui reprend les limites de l'ancienne daïra et comprend les communes de M'fatha et Saneg, couvre une superficie totale estimée à environ 270 km².

II.3.2. Relief :

Le relief de Ksar El Boukhari se caractérise par un paysage de transition entre les Hautes Plaines et l'Atlas tellien. La ville est implantée à une altitude moyenne comprise entre 600 et 650 mètres, sur un relief globalement modéré composé de plaines légèrement ondulées et de collines basses. Les pentes restent généralement faibles à moyennes, ce qui favorise l'urbanisation et les activités agricoles. Le territoire est également marqué par la présence de l'Oued Chélif, qui structure la topographie locale et contribue à la formation d'une vallée aux sols argilo-calcaires. L'ensemble présente ainsi un relief peu accidenté au centre urbain, devenant progressivement plus marqué vers les zones périphériques.

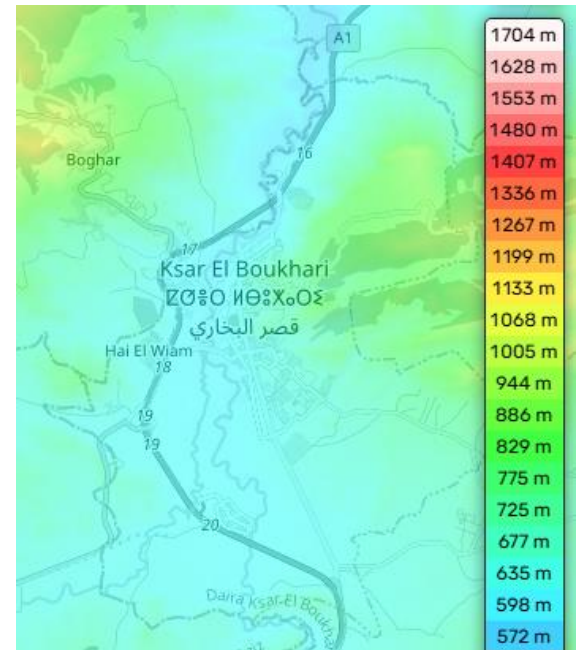


Figure II-3 Carte topographique

II.3.3. Climatologie :

La ville de Ksar El Boukhari connaît un climat de type semi-aride, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers frais avec des précipitations modérées, concentrées principalement entre novembre et avril. Les températures moyennes varient entre 6 °C en janvier et 35 °C en juillet, tandis que la pluviométrie annuelle est d'environ 400 à 500 mm. Ce climat influence directement les conditions de construction et l'entretien des infrastructures dans la région.

II.3.4. Objectifs du projet :

Le projet doit répondre aux exigences de développement régional et économique tout en se conformant aux normes ferroviaires nationaux et internationaux. Ses principaux objectifs sont:

- Réduire les durées de trajet tout en garantissant une circulation sûre.
- Favoriser la croissance économique de la région et dynamiser ses activités.
- Encourager une répartition équilibrée des populations et des activités sur le territoire.
- Appuyer le développement des Hauts-Plateaux et leur intégration.
- Stimuler le secteur de la construction et des travaux publics pendant les phases de réalisation.
- Améliorer la liaison et l'échange entre les différentes zones régionales.

- Préserver les ressources naturelles et assurer leur utilisation durable.
- Valoriser l'ensemble des atouts et potentialités locales pour un développement harmonieux.

II.3.5. Les paramètres de conception du projet :

- + Longueur du projet : **15 km** du **PK 0+000** au **PK 15+000**.
- + Nombre de voies : double voie.
- + Caractéristique de la voie : ligne mixte (voyageurs et marchandises).
- + Vitesse max des trains de voyageurs : **220 km /h**.
- + Vitesse max des trains de marchandises : **100 km /h**.
- + Type de rail : **UIC 60E1**
- + Les traverses : monobloc type **M450NP**.
- + Charge à l'essieu de conception en pleine voie : **22.5t**
- + Charges à l'essieu pour les ouvrages d'art : **25t**
- + Ecartement standard de la voie : **1.435m**
- + Largeur de la plateforme : **13.6 m** pour double voie.

II.3.6. Justificatif du choix de double voie :

Le choix de la double voie se justifie par la nécessité d'assurer une capacité élevée, une circulation fluide dans les deux sens, une meilleure sécurité, une réduction des temps de parcours et une exploitation plus fiable. Elle est également adaptée au trafic mixte (voyageurs et marchandises) et permet de répondre aux besoins futurs de développement du réseau ferroviaire.

II.4. Conclusion :

En résumé, ce projet de tracé ferroviaire constitue un levier stratégique pour le développement économique et social de la région et du pays. Il répond aux besoins de mobilité, d'investissement et de commerce tout en respectant les normes nationales et internationales. Sa réalisation permettra d'améliorer les échanges entre les régions, de dynamiser le secteur de travaux publics, de préserver les ressources naturelles et de valoriser les potentialités locales. Ainsi, ce projet s'inscrit comme un moteur de croissance durable et d'aménagement harmonieux du territoire.

Chapitre III : Géométrie de la voie

III. Géométrie de la voie :

III.1. Introduction :

L'ingénierie ferroviaire repose sur l'étude géométrique en tant que pilier fondamental pour assurer la sécurité, la performance et la pérennité d'une ligne ferroviaire. Cette phase essentielle permet de définir un tracé optimal, à la fois efficient et respectueux de l'environnement, tout en intégrant les contraintes topographiques du terrain ainsi que les exigences liées au trafic ferroviaire.

L'élaboration de cette étude s'appuie sur une méthodologie rigoureuse, fondée sur les normes et recommandations en vigueur dans le domaine ferroviaire. Elle s'inscrit notamment dans le cadre des directives établies par la Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF), lesquelles serviront de référence principale pour l'étude et la conception du présent projet.

III.2. Tracé en plan :

Le tracé en plan d'une voie ferrée est bien plus qu'une simple ligne sinueuse. Il s'agit d'une composition orchestrée d'alignements droits et de courbes savamment conçue pour garantir un voyage harmonieux et intégré à son environnement.

III.2.1. Conditions à respecter dans le tracé en plan :

- ✚ Privilégier le **maximum d'alignements droits** afin d'améliorer la stabilité dynamique et réduire les coûts d'entretien.
- ✚ Entre deux courbes successives, respecter une **longueur minimale** définie par $L_{min} = 0.5 \times V$ (V en km/h)
- ✚ Raccords progressifs entre les alignements droits et les courbes pour une meilleure transition.
- ✚ Suivre les courbes de niveau et adapté le tracé en plan au terrain naturel afin d'éviter les terrassements importants.
- ✚ Optimiser le tracé en évitant autant que possible le franchissement des oueds, des routes, des zones agricoles et résiduelles afin de limiter les coûts de construction et d'améliorer l'efficacité économique du projet.
- ✚ Prévenir l'implantation dans des zones sujettes à des défis géologiques et géotechniques (terrain instable, sols compressibles, la présence des nappes phréatiques...etc.). En cas de nécessité, une étude approfondie du sol est obligatoire à faire afin d'assurer la sécurité et l'efficacité opérationnelle de la voie.

III.2.2. Les éléments du tracé en plan :

L'axe du tracé en plan se compose d'une séquence d'alignements linéaires, des liaisons de transitions (raccordement progressif) et d'arcs de cercle tel qu'illustré dans le schéma ci-dessous :

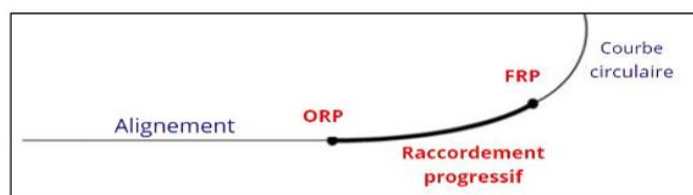


Figure III-1 Les éléments du tracé en plan

- ✚ L'alignement : $R = \infty$
- ✚ Raccordement progressive (RP) : $R = \text{variable}$.
- ✚ Courbe circulaire : $R = \text{constant}$.

III.2.3. Paramètres géométriques de la voie :

Le choix d'une vitesse voyageurs de 220 km/h et d'une vitesse marchandises de 100 km/h est conforme aux recommandations de la SNTF et au référentiel applicable, garantissant la stabilité dynamique des convois ainsi que le confort et la sécurité des usagers.

Tableau III.1 Vitesse des trains adoptées pour le projet

Vitesse de conception du tracé -Trafic voyageur	220 km/h
Vitesse de conception du tracé -Trafic marchandise	100 km/h

III.2.4. Dévers :

L'application du dévers sera obtenue par surélévation du rail extérieur par rapport au rail intérieur de façon à obtenir l'épaisseur de ballast nominale (30 cm) sous la file de rail la plus contraignante. La variation du dévers à l'entrée et à la sortie d'une courbe sera continue tout au long de la courbe de transition.

III.2.4.1. Dévers maximal :

Les valeurs limitent du dévers en voie autorisées par la norme IN 0272/SNTF chapitre 06, sont données dans le tableau suivant :

Tableau III.2 Limite de devers normal/exceptionnel

Paramètre	Valeur limite normale	Valeur-limite exceptionnelle
Devers maximal (mm)	160	180

III.2.4.2. Dévers théorique ou d'équilibre Dth:

Le dévers théorique annule totalement l'effet de la force centrifuge lors d'un passage du train à une vitesse V sur une courbe de rayon R , sa formule est la suivante :

$$D_{th} = \frac{11.8 V^2}{R}$$

D_{th} : Dévers théorique (mm),

R : Rayon de courbe (m),

V : Vitesse maximale rapide (km/h)

- ✚ Coefficient de dévers ou dévers prescrit d_p :

Le coefficient de dévers C , constant sur une section homogène, relie le dévers d_p à la courbure ($1/R$) et permet de respecter les limites du dévers et de ses variations.

Sa valeur optimale est :

$$C=0,006 V^2$$

La formule donnant le dévers prescrit dp est la suivante :

$$dp = \frac{1000 \times C}{R}$$

C : coefficient de dévers

V : la vitesse du train la plus rapide exprimée en Km/h.

R : Rayon de courbe (m)

Toutefois il pourra être ponctuellement adapté en raison de circonstance locales.

III.2.4.3. Insuffisance de dévers :

L'insuffisance de dévers est la différence entre le dévers nécessaire et le dévers appliqué, créant une accélération transversale non compensée, limitée pour assurer sécurité et confort.

La limitation de l'insuffisance de dévers I est donnée par la formule ci-dessous :

$$I = \frac{11.8 \times V^2}{R} - dp$$

Les valeurs maximales admissibles sont :

Tableau III.3 la limite de l'insuffisance de dévers

Paramètre	Valeur limite normale	Valeur limite exceptionnelle
Insuffisance de dévers maximal (mm)	150	160

III.2.4.4. Excès de dévers E :

L'excès de dévers E est limité pour éviter l'usure prématurée du rail intérieur dans les courbes (pour les circulations fret donc lentes). Il est calculé avec la formule suivante :

$$E = dp - \frac{11.8 \times V^2}{R}$$

V : la vitesse du train la plus lente exprimée en Km/h.

R : Rayon de courbe (m)

dp : dévers prescrit (mm) Les valeurs limites sont les suivantes :

Tableau III.4 – la limite de l'excès de dévers

Paramètre	Valeur limite normale	Valeur limite exceptionnelle
Excès de dévers (mm)	110	130

III.2.4.5. Variation de dévers en fonction de la longueur $\Delta d/\Delta L$:

La longueur des courbes de transition sera fonction du dévers adopté et du taux de variation de dévers admissible. Le tableau suivant reprend les valeurs admissibles de la variation de dévers en fonction de la longueur des courbes de transition.

Tableau III.5 Valeurs limite de la variation de dévers en fonction de la longueur

Paramètre	Valeur limite normale	Valeur limite exceptionnelle
Variation de dévers en fonction de la longueur (mm/m)	180 / V = 0.82	216 / V = 0.98

III.2.5. Raccordements progressifs

Les raccordements progressifs (RP) en clothoïde, assurent une transition progressive entre alignement et courbe avec variation linéaire du dévers. Entre deux courbes inverses proches, un RP d'inflexion peut remplacer l'alignement droit, avec variation symétrique des flèches et du dévers autour du point d'inflexion ($d = 0.00$).

Lorsque la vitesse est supérieure à 60 km/h et la variation de dévers supérieure à $60/V$,

Des doucines seront insérées aux extrémités des RP. (Norme RFF/SNCF IN 0272).

La longueur d'une courbe de transition ou d'un raccordement progressif est défini par les

Caractéristiques suivantes :

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

Les formules pour le calcul :

La longueur de raccordement progressif en fonction de variation de dévers

$$L_{rp} = \frac{D_p \times V_{max}}{3.6 \times dd/dt}$$

La longueur de raccordement progressif en fonction de variation de l'insuffisance de dévers

$$L_{rp} = \frac{I \times V_{max}}{3.6 \times dl/dt}$$

V : vitesse maximale

dl/dt : Variation de l'insuffisance de devers en fonction du temps .

dd/dt : Variation de devers en fonction du temps .

D_p : dévers pratique.

I : L'insuffisance de dévers

III.2.6. Application sur le projet

Considérons un exemple de calcul du rayon minimum R_{min} du notre tracé comme référence pour décrire les étapes de détermination de tous les paramètres correspondants.

III.2.6.1. Rayon minimum en plan Rmin

$$R_{min} = \frac{11.80 \times V^2_{max}}{d_{max} + I_{max}}$$

$$R_{min} = 1842.32$$

Rmin = Rayon minimum (m).

Vmax = Vitesse des trains rapide (voyageurs) (220 km/h).

dmax = Dévers maximal (160 mm).

I_{max} = Insuffisance de dévers exceptionnel (150 mm).

Pour une circulation à 220 Km/h, le rayon minimum calculé Rmin 1842.32, correspondant au dévers maximal normal de 160 mm et à une insuffisance de dévers de 130 mm.

➤ Exemple de calcul pour R=2000 m :

✚ Calcul de dévers théorique **D_{th}** :

- Le devers théorique pour les voyageurs :

$$D_{th} = \frac{11.8 \times V_v^2}{R} = \frac{11.8 \times 220^2}{2000} = 285.56 \text{ mm}$$

- Le devers théorique pour les trains de marchandise :

$$D_{th} = \frac{11.8 \times 100^2}{2000} = 59 \text{ mm (Adopté)}$$

✚ Calcul de dévers pratique **D_p** :

$$D_p = \frac{1000 \times C}{R}$$

Avec : C = 0,006 × V² = 0.006 × 220² = 290.4 mm

- C doit être un multiple de 15, donc C = 300 mm

- La valeur de C doit répondre à la relation suivante :

$$0.5 < \frac{C}{0.0118 \times V_{max}^2} < 0.7 \Rightarrow 0.5 < \frac{300}{0.0118 \times V_{max}^2} = 0.525 < 0.7$$

$$\text{Donc : } D_p = \frac{1000 \times C}{R} = \frac{1000 \times 300}{2000} = 150 \text{ mm} \leq 160 \text{ mm V\'erifi\'e}$$

✚ Insuffisance de dévers :

$$I = D_{th} - D_p = 285.56 - 150 = 135.56 \text{ mm} \leq 150 \text{ mm V\'erifi\'e}$$

✚ Excès de dévers :

$$E = D_p - D_{thm} = 150 - \frac{11.8 \times 100^2}{2000} = 150 - 59 = 91 \text{ mm} \leq 110 \text{ mm V\'erifi\'e}$$

Donc le devers pratique est le devers théorique marchandise : D = 59 mm

✚ Vérification de l'emploi de raccordement progressif :

$$\Delta_c = \frac{1000}{R} = \frac{1000}{2000} = 0.45$$

$$\text{Pour } V > 160 \text{ Km/h } \Delta_c > \frac{4000}{V_{max}^2} = \frac{4000}{220^2} = 0.08$$

Donc RP est obligatoire.

$$\text{Longueur de clothoïde : } L_{rp} = \frac{Dp}{\frac{dd}{dL}} = \frac{150}{0.82} = 182.92\text{m}$$

On prend $L_{rp} = 190\text{mm}$

$$A = \sqrt{R \times L_{rp}} = \sqrt{2000 \times 190} = 616.441 \text{ m}$$

$$\text{Variation de devers par rapport : } \frac{dd}{dt} = \frac{Dp \times V_{max}}{3.6 \times L_{rp}} = \frac{150 \times 220}{3.6 \times 190} = 48.24 \text{ mm/s} < 50 \text{ mm/s}$$

Limite de variation de devers par rapport à la longueur :

$$\frac{dd}{dL} = \frac{150}{190} = 0.7894 \text{ mm/m} < 0.82 \text{ mm/m}$$

La variation d'insuffisance de devers :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{I \times V_{max}}{3.6 \times L_{rp}} = \frac{135.56 \times 220}{3.6 \times 190} = 43.601 \text{ mm/s} < 75 \text{ mm/s}$$

Tableau III.6 Tableau récapitulatif des paramètres du tracé

Rayon (m)	Vitesse (Km/h)		Dth (mm)	Dp (mm) < 160 mm	Dp adopté	I (mm) ≤ 150 mm	E (mm) ≤ 110 mm	Lrp	Lrp adopté	$\frac{dd}{dL}$ < 0.82 mm/m	$\frac{dl}{dt}$ < 75 mm/s	$\frac{dd}{dt}$ < 50 mm/s	A (m)
	Vvoy	Vmar											
2000	220	100	285.56	150	150	135.56	91	183.33	190	0.789	43.6	48.25	616.4
2700	220	100	211.52	111.1	120	91.52	76.29	146.66	150	0.8	37.28	48.88	636.4
1900	220	100	300.58	157.9	159	141.58	96.89	194.33	200	0.795	43.26	48.58	616.4
3800	220	100	150.29	78.9	80	70.29	48.95	79.78	110	0.727	39.05	44.44	646.5

III.3. Profil en long :

Le **profil en long** constitue un élément fondamental dans la conception et la planification des infrastructures linéaires, telles que les voies ferrées et les canaux. Il s'agit d'un schéma graphique qui illustre de manière précise les variations d'altitude le long de l'axe du projet, permettant ainsi une meilleure compréhension des caractéristiques topographiques du terrain.

Dans le cadre des projets ferroviaires, le profil en long occupe une place centrale : il oriente les ingénieurs dans la conception géométrique du tracé, facilite la prise en compte des contraintes hydrauliques et géotechniques, et contribue à l'anticipation et à la prévention des risques naturels.

III.3.1. Les éléments du profil en long :

III.3.1.1. Les alignements droits :

Les alignements droits dans le profil en long d'une voie ferrée correspondent à des sections caractérisées par une déclivité constante, faible ou nulle, sur une longueur déterminée. Ces tronçons permettent d'assurer une circulation à vitesse stable, sans variation brusque d'effort de traction ou de freinage.

Ils sont généralement implantés sur des terrains plats ou faiblement inclinés, afin de garantir une stabilité dynamique optimale du matériel roulant. Cette configuration contribue ainsi à améliorer le confort des voyageurs, la sécurité de l'exploitation et la performance globale de la ligne ferroviaire.

Selon le référentiel SNTF (géométrie de la voie chapitre 6). La déclivité admise varie en fonction de sa longueur :

Tableau III.7 Valeurs limite de la longueur de déclivité maximale admissible

Longueur de la déclivité maximale admissible	Valeur limite normale P (‰)	Valeur limite exceptionnelle P(‰)
$L \leq 3000$ m	$P = 16$	$P = 18$
$3000 \leq L \leq 15000$ m	$13 \leq P \leq 16$	$15 \leq P \leq 18$
$L > 15000$ m	$P \leq 13$	$P \leq 15$

Le positionnement des alignements droits par rapport au terrain naturel est déterminé par plusieurs critères techniques visant à garantir une conception optimale du profil en long. Parmi ces considérations, on peut citer :

- ✓ Le respect des valeurs maximales admissibles des pentes.
- ✓ L'évitement des points bas en zones de déblais, tout en assurant un écoulement efficace des eaux pluviales.
- ✓ La conformité aux exigences géométriques prescrites par la réglementation en vigueur.
- ✓ La recherche d'un équilibre entre les volumes de remblais et de déblais afin d'optimiser les coûts de terrassement.
- ✓ En zone inondable, la mise en place d'un remblai dont la hauteur dépasse le niveau des plus hautes eaux (NPHE) majoré de 0,50 m.

Longueur minimale des pentes et des rampes uniformes

Afin de permettre l'amortissement des oscillations des suspensions il convient de définir une longueur minimale des rampes, pentes et de raccordement circulaire. Le tableau suivant montre les longueurs minimales des éléments du profil en long.

Tableau III.8 Valeurs limite de la longueur minimale des pentes ou des /rampes

Paramètre	Valeur limite normal	Valeur limite exceptionnelle
Longueur minimale des pentes et des rampes	$V/2=110$	$V/2.50=88$

III.3.1.2. Les cercles :

Les raccordements circulaires du profil en long des voies ferrées permettent d'assurer une transition progressive entre deux déclivités successives. Ils contribuent à limiter les accélérations verticales brusques ressenties par les voyageurs et le matériel roulant, améliorant ainsi le confort et la sécurité de circulation des trains.

Afin de réduire les accélérations verticales subies par la caisse des véhicules ferroviaires, les raccordements circulaires du profil en long doivent être dimensionnés en respectant les valeurs minimales des rayons indiquées dans le tableau ci-après :

Tableau III.9 Valeurs limite de la longueur minimale des rayons des raccordements

Paramètre	Valeur limite normal	Valeur limite exceptionnelle
Valeur minimale des rayons de raccordement (m)	$0.35 V^2 = 16\ 940$	$0.25 V^2 = 12\ 100$

III.3.1.3. Coordination entre le profil en long et le tracé en plan :

Afin d'assurer une cohérence géométrique et un niveau optimal de sécurité entre le profil en long et le tracé en plan, les principes suivants doivent être respectés :

- ✚ Éviter d'implanter une courbe verticale immédiatement après une courbe horizontale afin de ne pas cumuler les effets géométriques.
- ✚ Positionner les appareils de voie exclusivement sur des sections droites et sensiblement horizontales, en dehors des courbes et des rampes.
- ✚ Prévoir une zone plane d'une longueur comprise entre **900 m et 1500 m** pour l'implantation d'une gare.
- ✚ Éviter la superposition ou la correspondance directe entre les rayons des courbes verticales et horizontales, en implantant les points de changement de pente sur des tronçons à géométrie constante (alignements droits ou courbes circulaires continues).

III.4. Conclusion :

L'étude géométrique joue un rôle essentiel dans la conception des voies ferrées, car elle garantit la sécurité, le confort et la qualité d'exploitation. L'optimisation du tracé en plan et du profil en long permet d'assurer la faisabilité technique, la stabilité de l'infrastructure et une exploitation efficace.

De plus, le respect des normes et réglementations dès la phase de conception contribue à réduire les risques, à maîtriser les coûts et à assurer la durabilité du projet. Ainsi, une étude géométrique rigoureuse constitue la base d'une infrastructure ferroviaire fiable et pérenne.

Chapitre IV : Etude des contraintes

IV. Etude de contraintes :

IV.1. Introduction :

L'étude des contraintes constitue une étape préliminaire essentielle pour assurer le bon déroulement des travaux de terrassement et de pose de la voie. Elle a pour objectif d'identifier et d'analyser les obstacles présents le long du tracé, afin de garantir la sécurité des interventions ainsi que la continuité des services existants.

Cette analyse permet également d'anticiper les risques liés aux interactions avec les infrastructures en place et de définir les mesures de protection appropriées. Les contraintes recensées peuvent ainsi influencer les choix techniques, les méthodes d'exécution et le phasage des travaux.

Ce chapitre traite donc des différentes contraintes rencontrées, notamment celles liées au franchissement des conduites de gaz, des réseaux de transport d'électricité, ainsi que des routes et des pistes.

Sur le tronçon compris entre le PK 0+000 et le PK 15+000, plusieurs contraintes ont été identifiées, notamment :

La présence d'une fibre optique.

Des conduites de gaz.

Des lignes électriques moyennes tension (MT).

Des routes et chemins existants.

Des habitations.

IV.2. Les contraintes :

IV.2.1. Les différents réseaux existants :

Le tableau ci-après présente les réseaux existants (lignes électriques à basse et moyenne tension, conduite de gaz et fibre optique) qui seront protéger ou déplacer, ainsi que les points de croisement identifiés le long du tracé de la nouvelle ligne ferroviaire Ksar El Boukhari – Boughezoul, entre le PK 0+000 et le PK 15+000.

Tableau IV-1 Les réseaux existants

N°	Contraintes	Localisation	Solution a adopté	Concessionnaire
1	Ligne de fibre optique	Gare Ksar El Boukhari	À déplacer ou protéger	Algérie télécom
2	Ligne électrique MT	PK 2+411	À déplacer	Sonelgaz
3	Ligne électrique BT	PK 02+530	À déplacer	Sonelgaz

4	Ligne électrique MT	PK 02+735	À déplacer	Sonelgaz
5	Ligne électrique MT	PK 06+493	À déplacer	Sonelgaz
6	Ligne électrique MT	PK 06+662	À déplacer	Sonelgaz
7	Ligne GAZODUC	PK 06+835	À déplacer ou protéger	GRTG
8	Ligne électrique MT	PK 07+382	À déplacer	Sonelgaz
9	Ligne électrique MT	PK 08+982	À déplacer	Sonelgaz
10	Ligne électrique MT	PK 09+070	À déplacer	Sonelgaz
11	Ligne GAZUDUC	PK 10+430	À déplacer ou protéger	GRTG
12	Ligne électrique MT	PK 10+460	À déplacer	Sonelgaz
13	Ligne électrique BT	PK 11+908	À déplacer	Sonelgaz

IV.2.2. Les rétablissements routiers :

Le tracé intercepte plusieurs routes et pistes, dont le traitement doit être adapté en fonction de leur importance, du niveau de trafic et des caractéristiques du terrain. Pour chaque point de croisement, le choix de la solution dépend principalement de la vitesse de circulation des trains, de la topographie du site ainsi que de la nature de la voie concernée.

Trois types d'aménagements sont généralement envisagés :

- **Passage supérieur** : retenu lorsque la vitesse des trains est élevée (≥ 100 km/h) ou lorsque les contraintes du terrain l'imposent.
- **Passage à niveau** : envisageable pour les voies à faible trafic, sous réserve du respect des conditions de sécurité.
- **Passage inférieur** : adopté lorsque la configuration du relief favorise un franchissement par le bas.

L'interaction entre la section étudiée et le réseau routier existant, ainsi que les solutions techniques retenues dans le cadre du présent projet, sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau IV-2 Les routes croisées par le tracé projeté

Obstacle	PK	Type de passage	Type d'ouvrage
Piste	0+425	A dévié	-
Ancienne VF (non exploitée)	2+350	A supprimer	-
Autoroute nord-sud (A1)	2+500	Passage inférieur	Viaduc 1
Échangeur A1	2+580	Passage inférieur	Viaduc 1
A1	4+062	Passage inférieur	Viaduc 3
Piste	5+230	Passage inférieur	Viaduc 3
Piste	5+432	Passage inférieur	Viaduc 3
Route W1	5+450	Passage inférieur	Viaduc 3
Rue	5+545	Passage inférieur	Viaduc 3
Rue	5+587	Passage inférieur	Viaduc 3
Piste	6+225	Passage inférieur	Viaduc 4
Piste	6+680	A dévié	-
Déviations	6+750	Passage inférieur	Pont cadre
Piste	6+950	A dévié	-
A1	8+985	Passage inférieur	Viaduc 7
Piste	9+015	Passage inférieur	Viaduc 7
Route N127	10+225	Passage inférieur	Viaduc 8
Piste	11+750	Passage inférieur	Viaduc 10
Piste	12+100	Passage inférieur	Viaduc 11

Remarque :

Les pistes déviées seront déplacées vers d'autres accès pour garantir l'accessibilité aux habitations ou exploitation.

IV.2.3. Les bâtis :

Le tracé projeté passe par certains bâtis qui seront soit à éviter ou bien à démolir, dans le cas où le tracé traverse des bâtis des procédures d'expropriation seront engagées avec les propriétaires, pour cause d'utilité publique conformément à la loi algérienne (loi n° 91-11), incluant déclaration d'utilité publique, enquête parcellaire (identification des biens), évaluation des biens et indemnisation préalable, juste et équitable des propriétaires concernés.

Le tableau ci-après présente les bâtis traversés :

Tableau IV-3 Les bâtis traversés par le tracé projeté

Obstacle	PK
Bâti	4+125
Habitation	5+600
Habitation	5+637
Habitation	5+650
Habitation	5+700
Bâti	5+750
Bâti	5+775
Bâti	5+975
Bâti	6+000
Bâti	6+055
Bâti	11+950

IV.3. Visualisation des contraintes du tracé :

En utilisant les logiciels du BIM (Building Information Modeling) tel que Infrawork Autodesk nous avons fait une simulation 3D pour mieux voir les obstacles et les zones sensibles traversé par la voie ferrée afin d'éviter le maximum de contraintes présentes.

Les illustrations suivantes montrent les différentes contraintes :



Figure IV-1 Zone de future gare de Ksar El Boukhari



Figure IV-2 Franchissement de A1 et oued Chélif



Figure IV-3 Franchissement d'oued Chélif, 3 routes et des habitations



Figure IV-4 Passage inferieure (rétablissement routier)



Figure IV-5 Passage inférieur (route A1)



Figure IV-6 Franchissement de piste, bâtis

IV.4. Conclusion :

Le tronçon étudié présente plusieurs contraintes liées à la présence de réseaux et d'infrastructures existantes.

La prise en compte de ces éléments dès la phase de conception permet de définir des solutions techniques adaptées, garantissant à la fois la sécurité, la continuité des réseaux et la bonne exécution des travaux.

Chapitre V : Étude hydrologique et hydraulique

V. Étude hydrologique et hydraulique :

V.1. Introduction :

Dans le cadre des projets ferroviaires, l'hydrologie et l'hydraulique constituent des domaines essentiels pour la compréhension et la gestion des ressources en eau. À travers l'étude des précipitations, des écoulements des cours d'eau et des risques d'inondation, elles permettent d'évaluer les contraintes pouvant apparaître lors des phases de planification, de conception et de réalisation des lignes ferroviaires.

L'intégration des concepts théoriques et des méthodes pratiques permet également d'anticiper et de gérer les effets des phénomènes hydrologiques, contribuant ainsi à la sécurité, la robustesse et la durabilité des infrastructures ferroviaires.

Dans ce chapitre, une étude hydrologique et hydraulique sera réalisée pour le tronçon Ksar El Boukhari – Boughezoul de la nouvelle ligne ferroviaire Boumedfaa – Djelfa, s'étendant du PK 0+000 au PK 15+000.

V.2. Description générale :

De manière générale, les projets de lignes ferroviaires traversent des régions présentant des caractéristiques topographiques variées, telles que des plaines, des plateaux ou des zones de versants à fortes pentes. Dans plusieurs cas, le tracé doit également franchir des oueds et leurs affluents, ce qui nécessite la réalisation d'études hydrologiques et hydrauliques afin d'assurer l'évacuation correcte des eaux et de dimensionner convenablement les ouvrages de franchissement.

Dans le cadre de notre projet de la nouvelle ligne ferroviaire reliant **El Ksar à Boughezoul**, le premier tronçon compris entre **PK 0+000 et PK 15+000** traverse une région caractérisée par des **flancs de coteaux à fortes pentes**. Le tracé projeté franchit également à plusieurs endroits **les affluents du grand oued Chélif**, ce qui nécessite une attention particulière lors de l'étude hydrologique et hydraulique afin de garantir la stabilité des infrastructures ferroviaires et la sécurité de l'exploitation.

V.3. Etude hydrologique :

Une étude hydrologique consiste à analyser en profondeur les processus hydrologiques d'une zone spécifique en collectant des données sur les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration, le ruissellement et le débit des cours d'eau. Son but principal est de caractériser la disponibilité et la répartition de l'eau dans la région ce qui permet d'estimer les débits de crue, d'évaluer les risques d'inondation et de dimensionner les ouvrages hydrauliques.

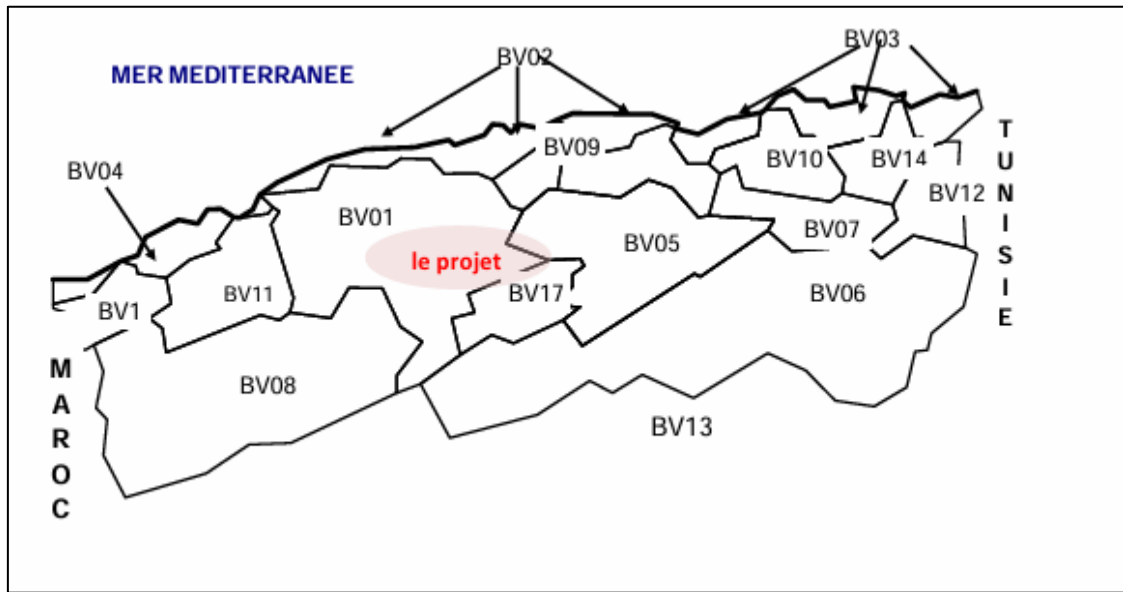


Figure V-1 Carte de situation de la région d'étude

V.4. Climatologie. Aspects Générales :

V.4.1. Pluviométrie Moyenne :

Le climat de la vallée du Chélif est typiquement méditerranéen, avec des étés chauds et secs et des hivers frais et pluvieux. La pluviométrie est malgré tout très faible. Les moyennes annuelles pour les stations d'El Khémis, El Chelef et Relizane sont respectivement de **473, 400 et 325 mm**.

Comme on peut le voir dans la figure suivante, l'ouvrage se situe dans la région de l'Algérie du Nord la plus sèche. Les valeurs de pluviosité annuelle moyennent, correspondant à la couleur **orange/rouge**, varient entre **300 et 350 mm**.

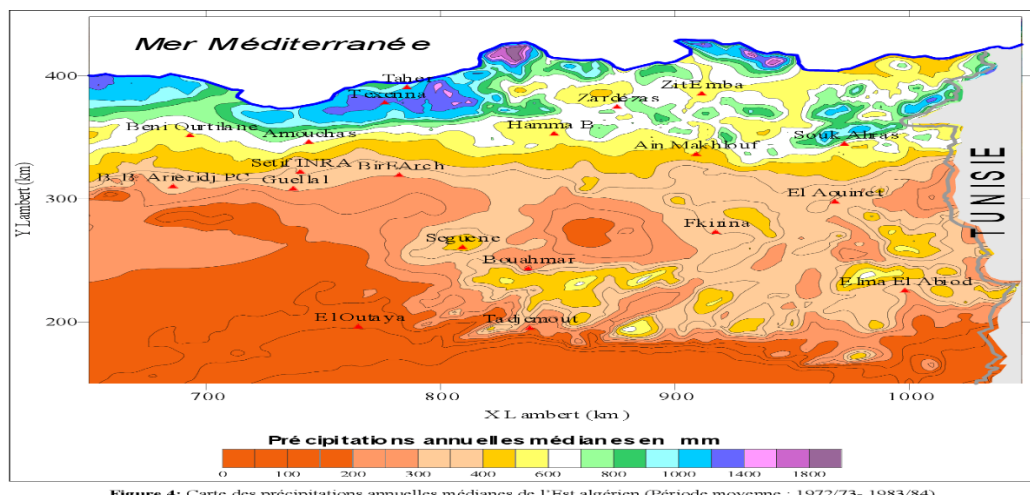


Figure V-2 Carte pluviométrique du nord de l'Algérie

V.4.2. Températures :

Les conditions climatiques de température dans la région sont de type semi-aride, avec des gradients importants, caractérisés par un hiver froid et un été chaud et sec entrecoupé par des orages faibles et localisés.

Dans cette région, le gradient de température moyenne du mois le plus froid au mois le plus chaud varie de **9.8°C à 29.3°C**.

Durant les mois les plus chauds, **juillet et août**, la température dépasse fréquemment **30°C**. Les mois les plus froids sont enregistrés entre **décembre et février**, où la température moyenne se situe autour de **10°C**.

Tableau V.1 Température moyenne pour la région en analyse

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Température °C	9.8	11.3	13.5	15.8	20.0	25.3	29.3	29.3	26.0	20.4	15.3	11.2

V.4.3. Ensoleillement :

Appartenant à l'hémisphère nord, l'Algérie registre les plus grandes valeurs d'insolation au mois de Juillet.

Dans le Tableau V.2, on peut consulter les valeurs moyennes d'ensoleillement.

Tableau V.2 Durées moyennes d'ensoleillement pour la région en analyse

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Ensoleillement h/jour	5.3	5.9	7.4	8.1	9.1	10.1	11.1	9.6	7	6.8	5.4	4.6

V.4.4. Evaporation et Evapotranspiration :

L'évapotranspiration est une variable importante dans le domaine de l'hydrologie. Les valeurs issues de la bibliographie montrent qu'elle est particulièrement élevée durant la période estivale. Dans le tableau présenté ci-dessous, on peut observer qu'elle atteint son maximum au mois de juillet et son minimum au mois de décembre.

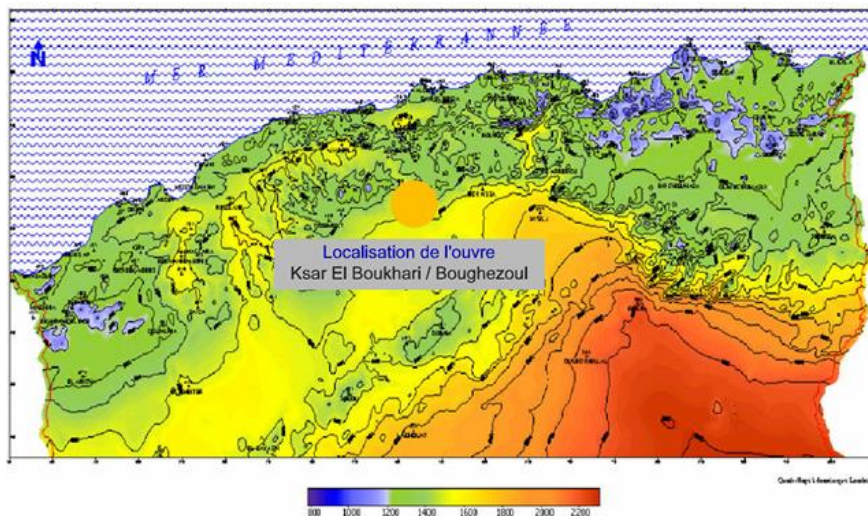


Figure V-3 Localisation de l'ouvrage sur la carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie

V.5. Climat. Température et Pluies en Ksar el Boukhari et Boughezoul

La ville de Ksar El Boukhari possède un climat tempéré chaud de type Csa selon la classification de Köppen–Geiger climate classification. La température moyenne annuelle est d'environ 16,2 °C et les précipitations moyennes atteignent 438 mm par an. Les pluies sont plus importantes en hiver qu'en été. Le mois le plus pluvieux est janvier avec environ 64 mm, tandis que juillet est le plus sec avec seulement 3 mm. Août est le mois le plus chaud (26,5 °C) et janvier le plus froid (7,6 °C).

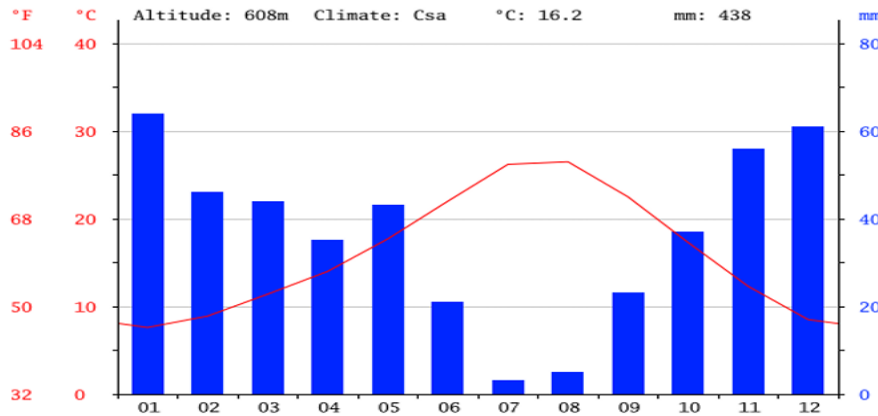


Figure V-4 Pluie et température moyenne à Ksar El Boukhari

La ville de Boughezoul possède un climat de steppe de type BSk selon la classification de Köppen–Geiger climate classification. La température moyenne annuelle est d'environ 15,8 °C, tandis que les précipitations moyennes annuelles atteignent 347 mm. Les pluies sont faibles tout au long de l'année. Le mois le plus sec est **juillet** avec environ 3 mm, alors que **janvier** est le plus pluvieux avec environ 47 mm. **Août** est le mois le plus chaud (25,6 °C) et **janvier** le plus froid (7,4 °C).

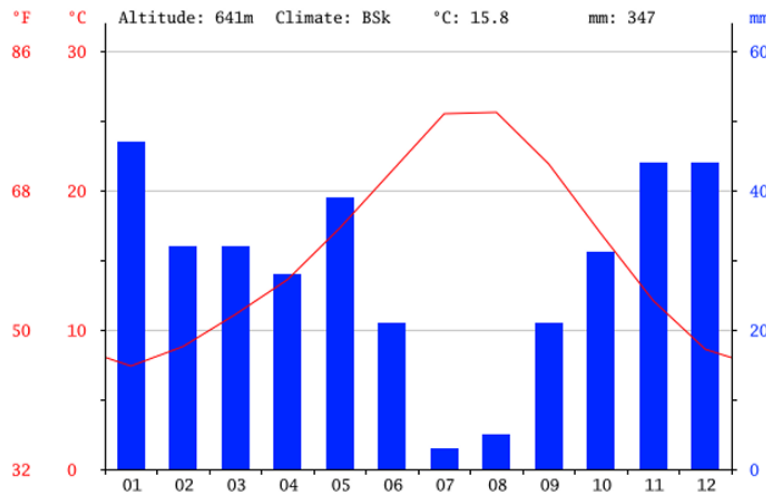


Figure V-5 Pluie et température moyenne à Boughezoul

V.6. Donnée pluviométrique :

Pour obtenir les données pluviométriques, on a consulté la carte pluviométrique, les données de l'ANRH et des sites internet. Ci-dessous, on présente les valeurs obtenues.

V.6.1. Pluies annuelles

Carte pluviométrique : Les valeurs de la pluviométrie moyenne annuelle dans la région étudiée varient entre 300 et 450 mm :

- Ville de Ksar El Boukhari : 438 mm (Nord)
- Ville de Boughezoul : 347 mm (Sud)
- Ville de Chlef : 394 mm (Sud)

Les données des stations pluviométriques de Boughezoul, Ksar El Boukhari, Chahbounia, Aïn Oussera et Charef, fournies par l'ANRH, ont également été utilisées.

Par ailleurs, des études réalisées antérieurement pour la même région ont été consultées.

V.6.2. Pluies journalières :

La protection contre les dégâts des eaux nécessite de s'intéresser aux pluies journalières maximales annuelles.

Théoriquement, les valeurs extrêmes s'ajustent à une loi des valeurs extrêmes. En Algérie, il est vérifié que les pluies journalières maximales annuelles s'ajustent à une loi de Gumbel.

V.6.3. Analyse des valeurs. Lectures des stations pour obtenir Pluies Journalières Maximales Annuelles et Pluies Annuelles :

Les données des stations pluviométriques ont été étudiées statistiquement en utilisant les lois de régression Normal, Log normal, Gumbel et Pearson III.

Les stations pluviométriques considérées, les résultats des pluies journalières maximales annuelles et des pluies annuelles sont présentées ci-dessous :

Tableau V- 3 : Stations pluviométriques

Station Pluviométrique	Code Station ANRH	X	Y	Z
KSAR EL BOUKHARI	011301	476588,1100	3971457,1500	630,00
BOUGZHOU	011208	479840,0200	3955797,4800	643,00
CHAHBOUNIA	011206	463970,8000	3932946,5500	665,00
AIN OUSSERA	011205	491138,5200	3922814,2800	690,00
CHAREF	070102	481860,2800	3830807,8400	1200,00

Le tableau suivant présente les valeurs de pluies journalières et annuelle maximales prises par les stations.

Tableau V- 4 : Pluies Journalières Maximales Annuelles et Pluies Annuelles. Distribution statistique

Temps de Retour (T) ans	Fréquence	Ksar el Boukhari Journalière	Ksar el Boukhari Annuelle	Boughzoul Journalière	Boughzoul Annuelle	Ain Oussera Journalière	Ain Oussera Annuelle
2	0.5	38,57	349,57	30,44	275,16	36,88	277,55
5	0.8	53,12	462,19	39,52	337,79	43,53	342,22
10	0.9	64,71	551,54	44,27	370,53	47,06	383,85
20	0.95	77,49	649,77	48,19	397,57	49,97	423,26
50	0.98	96,83	798,00	52,60	428,00	53,25	474,05
100	0.99	113,75	927,23	55,55	448,28	55,43	512,31
500	0.998	162,75	1299,90	61,50	489,35	59,85	602,66
1000	0.999	189,03	1499,10	63,79	505,13	61,55	642,75

V.7. Caractérisation des bassins versants :

Le bassin versant est une surface géographique délimitée par des lignes de partage des eaux, où toutes les eaux (précipitations, ruissellement) convergent vers un même exutoire (tel qu'un oued ou un barrage).

Les lignes de partage topographiques : elles sont déterminées en fonction du relief, en suivant les courbes de niveau.

Les lignes de partage hydrographiques : elles prennent en compte les écoulements et les alimentations souterraines.

V.7.1. Délimitation du bassin versant :

La délimitation du bassin versant consiste à tracer la ligne de partage des eaux, qui sépare les eaux de ruissellement s'écoulant vers le bassin étudié de celles dirigées vers les bassins voisins. Cette ligne suit généralement les lignes de crête, reliant les points de plus haute altitude entre les bassins adjacents.

Elle est déterminée à partir de l'analyse des courbes de niveau sur les cartes topographiques, en identifiant les sommets (crêtes) et les talwegs (lignes d'écoulement). Ainsi, toute précipitation tombant à l'intérieur de ce contour est drainée vers un exutoire unique.

Les figures suivantes présentent un exemple pratique illustrant la manière de délimiter (dessiner) le bassin versant, et elles fournissent également un schéma des bassins versants déterminés dans le cadre de l'étude du projet de la ligne de chemin de fer, sur le tronçon reliant Ksar El Boukhari à Boughezoul.

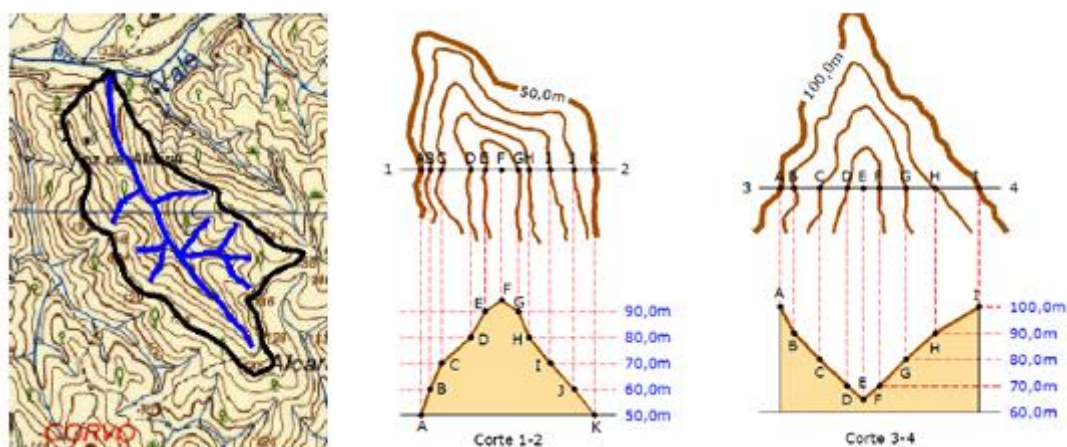


Figure V-6 Exemples de Bassin versant / Crête / Thalweg / Vallée

Les bassins versants traversés par notre tracé sont délimités par AutoCAD en utilisant les cartes d'état-major avec un échelle de 1/50 000 et à l'aide du logiciel Global mapper.

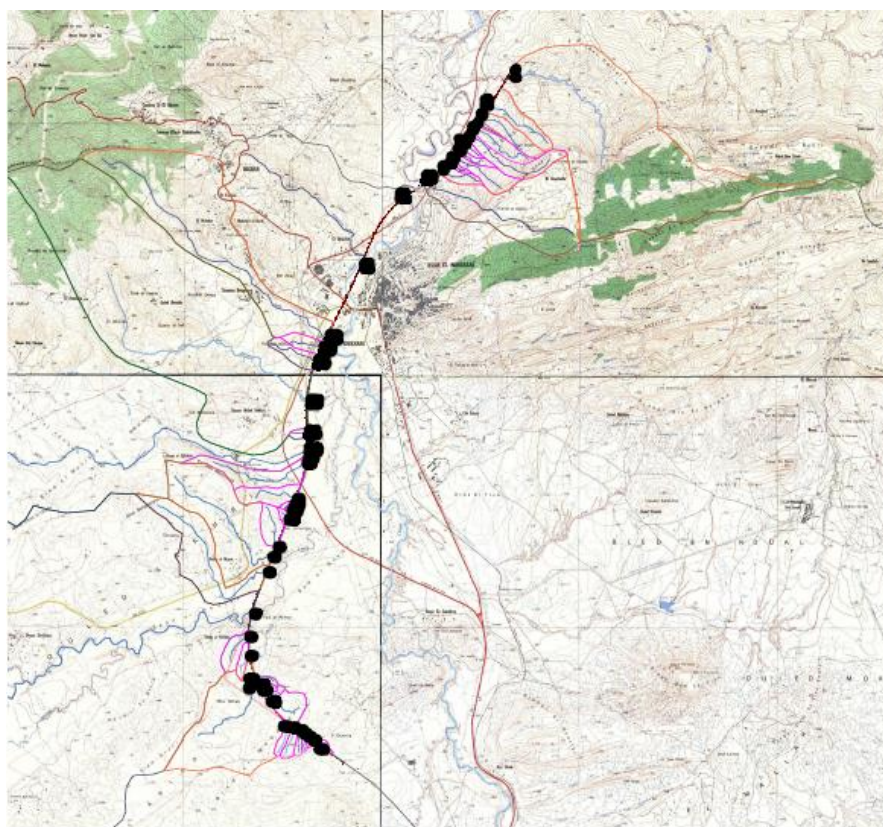


Figure V-7 La délimitation des bassins versants sur les cartes d'état-major

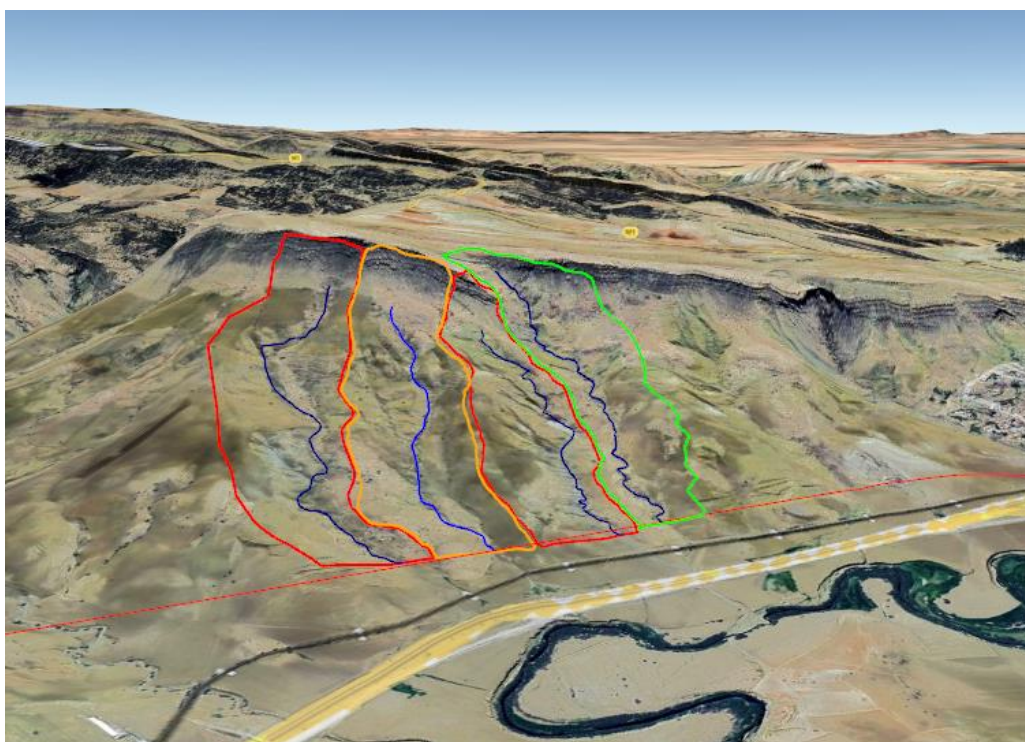


Figure V-8 Exemple de délimitation des bassins versants avec google earth

✚ Paramètres du bassin versant et calcul du temps de concentration :
Les paramètres suivants ont été déterminés pour chaque bassin versant :

S [Km²] : Surface du bassin versant

P [Km] : Périmètre du bassin versant

Lw [Km] : Longueur du cours d'eau le plus long

Hmax [m] : Altitude maximale

Hmin [m] : Altitude minimale

Hmoy [m] : Altitude moyenne

I [m/m] : Pente moyenne

Tc [h] : Temps de concentration

V.7.2. Calcul du temps de concentration (Tc) :

✚ Superficie inférieure à 5 Km² :

Le temps de concentration est calculé selon la formule de **PETIT BASSIN** :

$$TC = 0.127 \times \left(\frac{S}{P}\right)^{0.5}$$

Tc : temps de concentration en minutes.

S : surface du bassin versant en km².

P : pente moyenne en %.

 Superficie comprise entre 5 et 25 Km² :

Le temps de concentration est calculé selon la formule de **PASSINI** :

$$TC = 0.108 \times \frac{\sqrt[3]{S \times Lw}}{\sqrt{I}}$$

Tc [h] : temps de concentration.

S [Km²] : superficie du bassin versant.

Lw [Km] : longueur du cours d'eau principal

I [m/m] : pente moyenne du bassin versant.

 Superficie supérieure à 25 Km² :

Le temps de concentration est calculé selon la formule de **GIANDOTTI** :

$$Tc = \frac{4\sqrt{S} + 1.5Lw}{0.8 \sqrt{Hmoy - Hmin}}$$

Tc [h] : temps de concentration.

S [Km²] : superficie du bassin versant.

Lw [Km] : longueur du cours d'eau principal.

Hmoy [m] : altitude moyenne.

Hmin [m] : altitude minimale.

- Les caractéristiques des bassins versants liés au tronçon Ksar El Boukhari – Boughezoul sur un linéaire de 15 Km à partir de la gare de Ksar El Boukhari sont mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau V-5 : Caractéristiques morphométriques des bassins versants

N° BV	PK	Surface (Km ²)	Lw (m)	Hmax (m)	Hmin (m)	P(Km)	Kc	I (m /m)	Tc(h)
BV1	0+275	8,42	3960	879	608	15,609	1,51	0,0684	1,329
BV2	0+875	0,44	1340	813	615	4,055	1,71	0,1478	0,219
BV3	1+062	0,33	990	765	608	2,999	1,46	0,1586	0,183

BV4	1+150	0,03	460	671	608	1,155	1,87	0,1370	0,059
BV5	1+350	0,27	1300	816	610	2,815	1,52	0,1585	0,166
BV6	1+450	0,46	1800	902	613	4,38	1,81	0,1606	0,215
BV7	1+625	0,04	280	659	617	1,057	1,48	0,1500	0,066
BV8	1+823	0,07	490	685	623	1,611	1,71	0,1265	0,094
BV9	1+938	0,32	1010	790	618	3,007	1,49	0,1703	0,174
BV10	2+073	0,03	270	646	617	0,989	1,59	0,1074	0,067
BV11	2+350	0,14	77	712	619	1,934	1,45	1,2078	0,043
BV12	2+650	2,68	3080	909	605	8,145	1,39	0,0987	0,662
BV13	2+850- 3+075- 4+645- 5+274	20894,32	281440	1420	605	910,44	1,76	0,0029	61,944
BV14	6+138	4,47	5760	1110	605	13,037	1,73	0,0877	0,907
BV15	6+360	0,17	580	633	605	1,882	1,28	0,0483	0,238
BV16	6+645	0,24	930	655	608	2,388	1,36	0,0505	0,277
BV17	7+390	12,80	5630	842	609	17,697	1,38	0,0414	2,209
BV18	7+970	0,05	300	614	611	0,932	1,17	0,0100	0,284
BV19	8+316	17,90	8350	1032	612	24,035	1,59	0,0503	2,556
BV20	8+380	0,00	25	613	612	0,202	1,26	0,0400	0,028
BV21	8+413	0,00	80	614	612	0,278	1,23	0,0250	0,050
BV22	8+505	0,61	1960	680	612	5,423	1,94	0,0347	0,533
BV23	9+058	0,34	890	656	629	2,952	1,42	0,0303	0,425
BV24	10+240	0,26	850	666	624	2,214	1,22	0,0494	0,291
BV25	10+360	2,23	2820	660	617	7,292	1,36	0,0152	1,536
BV26	10+650	1,44	3300	691	618	7,95	1,85	0,0221	1,025
BV27	11+500	41,67	8810	1427	617	39,269	1,70	0,0919	2,425
BV28	11+822	0,20	720	676	636	1,976	1,24	0,0556	0,241

BV29	12+317	0,10	370	669	642	1,591	1,44	0,0730	0,146
BV30	12+545	2,54	1660	699	644	7,468	1,31	0,0331	1,112
BV31	13+130	0,03	300	677	656	0,884	1,34	0,0700	0,089
BV32	13+178	0,06	410	684	659	1,246	1,39	0,0610	0,129
BV33	13+195	0,28	710	677	665	2,184	1,16	0,0169	0,517
BV34	13+995	0,03	290	708	682	0,78	1,30	0,0897	0,071
BV35	14+430	0,02	120	707	690	0,511	1,17	0,1417	0,041
BV36	14+548	0,01	77	704	695	0,353	1,18	0,1169	0,032
BV37	14+567	0,03	130	688	667	0,78	1,33	0,1615	0,052

V.7.3. Calcul des débits maximaux (Les crues) :

Pour le calcul des débits de pointe de crue (de périodes de retour de 100 ans) on va utiliser la méthode rationnelle.

V.7.4. La méthode rationnelle :

La méthode rationnelle permet de calculer le débit maximal associé à une certaine période de retour. Elle est applicable pour les bassins versants ayant une surface inférieure à 25 km².

$$Q_{max} = \frac{C \times I \times A}{3.6}$$

Q_{max} : débit maximal de la crue (m³/s).

C : coefficient de ruissellement.

I : intensité des pluies maximales (mm/h).

A : surface du bassin versant (km²).

✚ Pour la détermination du coefficient du ruissellement Cr, nous avons opté pour la méthode de KENESSEY : **Cr = C1 + C2 + C3**

➤ **C1** : coefficient lié à la pente du cours d'eau principal, il varie :

Tableau V-6 : Valeur de C1

La pente (I)	C1
$I < 3.5 \%$	0.01 – 0.05
$3.5 \% < I < 11 \%$	0.06 – 0.1
$11 \% < I < 35 \%$	0.12 – 0.2
$I \geq 35 \%$	0.22 – 0.3

➤ C2 : dépend de la perméabilité du terrain, il varie :

Tableau V-7 : Valeur de C2

La perméabilité	C2
Les terrains imperméables	0.22 – 0.3
Les terrains pas assez perméables	0.1 – 0.2
Les terrains perméables	0.06 – 0.1
Les terrains très perméables	0.06 – 0.05

➤ C3 : dépend de la couverture végétale du bassin versant, il varie :

Tableau V-8 : Valeur de C3

La couverture végétale	C3
Les terrains rocheux	0.22 – 0.3
Les Prés	0.17 – 0.25
Les champs labours	0.07 – 0.15
Les forêts et les sols sableux	0.03 – 0.05

L'intensité des pluies :

La détermination de l'intensité des précipitations de calcul a été faite par la méthode graphique, en utilisant le graphique Intensité-Durée-Fréquence pour des périodes de retour allant de 10 ans à 100 ans.

La relation Intensité - Durée - Fréquence recherchée est de la forme :

$$I(t, T) = \frac{a(T)}{t^b}$$

$I(t,T)$: Intensité de pluie en mm/h

T : période de retour

t : temps en heures

a et b : paramètres de Montana

La relation obtenue est la suivante pour la station de Ksar el Boukhari :

$$I(t, T) = \frac{a(T)}{t^{0.7}}$$

Tableau V-9 : Valeurs de (a) pour les différentes fréquences

T	2	5	10	20	50	100
a	13,2	19,5	23,6	27,6	32,8	36,6

V.7.5. La formule de Transition :

Pour des superficies comprises entre 10 et 50 Km²

$$Q_{(T)} = \alpha \cdot QR_{(T)} + \beta \cdot QC_{(T)}$$

- $Q_{(T)} \left(\frac{m^3}{s}\right)$: Débit de projet de temps de retour T . m³ /s

- $QR_{(T)} \left(\frac{m^3}{s}\right)$: Débit fourni par la formule rationnelle de temps de retour T .

- $QC_{(T)} \left(\frac{m^3}{s}\right)$: Débit fourni par la formule Crupidex de temps de retour T .

La méthode de Crupidex permet l'estimation du débit de pointe décennal Q_{10}

$$Q_{10} = A^{0.8} \cdot \left(\frac{P_{10}}{80}\right) \cdot R$$

- $Q_{10} \left(\frac{m^3}{s}\right)$: Débit de crue instantané de fréquence décennale.

- A (Km²) : Superficie du bassin versant.

- P_{10} (mm) : pluie journalière de période de retour décennale.

- R : Coefficient régional traduisant l'aptitude au ruissellement que l'on prendra 1

- α et β : Coefficients de pondération.

Tel que α varie linéairement de 1 à 0 lorsque la superficie S croît de 10 à 50 Km²

$$\alpha = \frac{50-S}{40} \text{ et } \beta = 1 - \alpha$$

V.7.6. La formule de MALLET ET GAUTHIER :

Pour des superficies supérieures à 100 Km²

$$Qp = 2 \frac{K \cdot S}{\sqrt{L}} \cdot \text{Log}(1 + APa) \cdot \sqrt{1 + 4\text{Log}(T) - \text{Log}(S)}$$

$Qp \left(\frac{m^3}{s}\right)$: Débit de pointe de crue.

S : Surface en Km²

L : Longueur de l'oued principal en Km

A=20 en Algérie

0,5<K<6. K=1,5 en Algérie

Pa : Pluie annuelle en mm

T : Temps de retour (ans)

Tableau V-10 : Le débits maximaux centennaux et les intensités de pluie centennales

N° BV	PK	Surface (Km ²)	Lw (m)	Cr	I (m /m)	Tc(h)	I ₁₀₀ (mm/h)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)
BV1	0+275	8,42	3960	0,49	0,0684	1,329	30,00	34,38
BV2	0+875	0,44	1340	0,55	0,1478	0,219	105,91	7,12
BV3	1+062	0,33	990	0,55	0,1586	0,183	120,07	6,05
BV4	1+150	0,03	460	0,55	0,1370	0,059	264,02	1,21
BV5	1+350	0,27	1300	0,55	0,1585	0,166	128,77	5,31
BV6	1+450	0,46	1800	0,65	0,1606	0,215	107,35	8,92
BV7	1+625	0,04	280	0,65	0,1500	0,066	246,45	1,78
BV8	1+823	0,07	490	0,55	0,1265	0,094	190,90	2,04
BV9	1+938	0,32	1010	0,55	0,1703	0,174	124,43	6,08
BV10	2+073	0,03	270	0,55	0,1074	0,067	242,49	1,11
BV11	2+350	0,14	77	0,6	1,2078	0,043	329,89	7,70
BV12	2+650	2,68	3080	0,44	0,0987	0,662	48,86	16,01
BV13	2+850- 3+075- 4+645- 5+274	20894,32	281440	0,55	0,0029	61,944	2,04	15931,98
BV14	6+138	4,47	5760	0,49	0,0877	0,907	39,19	23,85
BV15	6+360	0,17	580	0,55	0,0483	0,238	99,88	2,59

BV16	6+645	0,24	930	0,49	0,0505	0,277	89,95	2,94
BV17	7+390	12,80	5630	0,49	0,0414	2,209	21,01	36,61
BV18	7+970	0,05	300	0,44	0,0100	0,284	88,34	0,54
BV19	8+316	17,90	8350	0,44	0,0503	2,556	18,98	41,52
BV20	8+380	0,00	25	0,44	0,0400	0,028	442,77	0,11
BV21	8+413	0,00	80	0,44	0,0250	0,050	300,04	0,14
BV22	8+505	0,61	1960	0,44	0,0347	0,533	56,89	4,24
BV23	9+058	0,34	890	0,44	0,0303	0,425	66,60	2,77
BV24	10+240	0,26	850	0,44	0,0494	0,291	86,78	2,76
BV25	10+360	2,23	2820	0,44	0,0152	1,536	27,10	7,39
BV26	10+650	1,44	3300	0,44	0,0221	1,025	35,98	6,33
BV27	11+500	41,67	8810	0,49	0,0919	2,425	19,69	33,49
BV28	11+822	0,20	720	0,49	0,0556	0,241	99,11	2,70
BV29	12+317	0,10	370	0,65	0,0730	0,146	140,97	2,44
BV30	12+545	2,54	1660	0,49	0,0331	1,112	33,98	11,75
BV31	13+130	0,03	300	0,65	0,0700	0,089	199,80	1,23
BV32	13+178	0,06	410	0,55	0,0610	0,129	153,41	1,48
BV33	13+195	0,28	710	0,49	0,0169	0,517	58,09	2,21
BV34	13+995	0,03	290	0,55	0,0897	0,071	233,19	1,00
BV35	14+430	0,02	120	0,55	0,1417	0,041	340,51	0,78
BV36	14+548	0,01	77	0,49	0,1169	0,032	407,66	0,41
BV37	14+567	0,03	130	0,49	0,1615	0,052	290,23	1,07

V.8. Étude hydraulique :

Les études hydrauliques sont indispensables dans les zones exposées aux inondations, car elles permettent de concevoir des ouvrages capables d'évacuer efficacement les flux d'eau, assurant ainsi la protection, la durabilité des voies ferrées et la sécurité des usagers.

V.8.1. Méthode de Manning-Strickler :

Les ouvrages hydrauliques sont dimensionnés pour évacuer les écoulements d'eau dues aux précipitations en évitant tout engorgement lors de conditions météorologiques difficiles, cette méthode permet d'estimer le débit de saturation des ouvrages transversaux et longitudinaux.

$$Q_s = K_s S_m R_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad \text{Avec : } R_h = \frac{S_m}{P_m}$$

Avec :

Q_s : débit de saturation (m^3/s)

S : section mouillée de l'ouvrage (m^2)

K_s : coefficient de rugosité des parois de l'ouvrage.

R_h : rayon hydraulique (m)

I : pente longitudinale de l'ouvrage (m/m)

V.8.2. Dimensionnement des ouvrages transversaux :

Les dimensions sélectionnées pour les ouvrages sont celles qui satisfont aux deux conditions suivantes :

- $Q_{100} < Q_{ps}$ Avec Q_{100} : débit de projet Q_{max}
 Q_{ps} : débit de saturation de l'ouvrage

- Les conditions d'auto-curage :

L'auto-curage est la capacité d'un réseau d'assainissement à déplacer les particules solides pour éviter leur accumulation dans le système de drainage.

Ces conditions sont les suivants :

- $V > 0.6 \text{ m/s}$ pour $Q = 0.1 Q_{ps}$
- $V > 0.3 \text{ m/s}$ pour $Q = 0.01 Q_{ps}$
- $V_{ps} < 4 \text{ m/s}$

V.8.2.1. Dimensionnement des buses :

Les buses sont des ouvrages de sections circulaires préfabriqués en béton armé disposés sous le tracé sur les points bas du terrain.

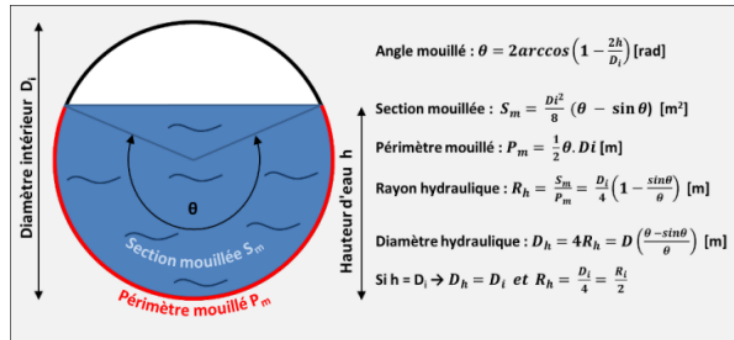


Figure V-9 Ouvrage hydraulique (buse)

- $S_m = \pi R^2$: surface mouillée (m²)
- $P_m = 2\pi R$: périmètre mouillé (m)
- $R_h = \frac{S_m}{P_m} = \frac{\pi R^2}{2\pi R} = \frac{D}{4}$: rayon hydraulique (m)

On a la formule de Manning-Strickler :

$$Q_s = K_s S_m R_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$$

On prend le bassin versant n° 3, dont le débit $Q_{100} = 1,21 \text{ m}^3/\text{s}$

Calculer le diamètre théorique :

$$\begin{aligned} \emptyset_{th} &= 1000 \times 4^{\left(\frac{5}{8}\right)} \times \left(\frac{Q_{100}}{70 \times \pi \times \sqrt{I}} \right)^{\frac{3}{8}} \\ \rightarrow \emptyset_{th} &= 1000 \times 4^{\left(\frac{5}{8}\right)} \times \left(\frac{6.05}{70 \times \pi \times \sqrt{0.01}} \right)^{\frac{3}{8}} \rightarrow \emptyset_{th} = 1466 \text{ mm} \end{aligned}$$

Soit une buse de $\emptyset = 1500 \text{ mm}$

- $S_m = 1.76 \text{ m}^2$
- Une pente de $I = 1\%$
- Buse en béton : $K_s = 70$
 - Calcul du débit de transition :

$$Q_{ps} = K_s S_m R_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} = 70 \times 1.76 \times \frac{1.5^{\frac{2}{3}}}{4} \times 0.01^{\frac{1}{2}} = 6.43 \text{ m}^3/\text{s}$$

On vérifie les conditions d'auto-curage :

- 1ere condition :
Pour $Q = 0.1 Q_{ps}$ il faut $V > 0.6 \text{ m/s}$
 $R_q = Q/Q_{ps} = 0.1$ et $R_v = V/V_{ps} = 0.64$ alors $V = 0.64 \times 3.64 = 2.33 \text{ m/s}$
- 2ème condition :
Pour $Q = 0.01 Q_{ps}$ il faut $V > 0.3 \text{ m/s}$
 $R_q = Q/Q_{ps} = 0.01$ et $R_v = V/V_{ps} = 0.32$ alors $V = 0.32 \times 3.64 = 1.16 \text{ m/s}$

- 3^{ème} condition :

$$V_{ps} = 3,64 < 4 \text{ m/s}$$

Et $Q_{100} < Q_s$, c'est vérifié.

Les conditions d'auto-curage sont vérifiées.

V.8.2.2. Dimensionnement des dalots :

Les dalots sont des ouvrages de sections rectangulaire en béton armé disposés sous le tracé sur les points bas du terrain.

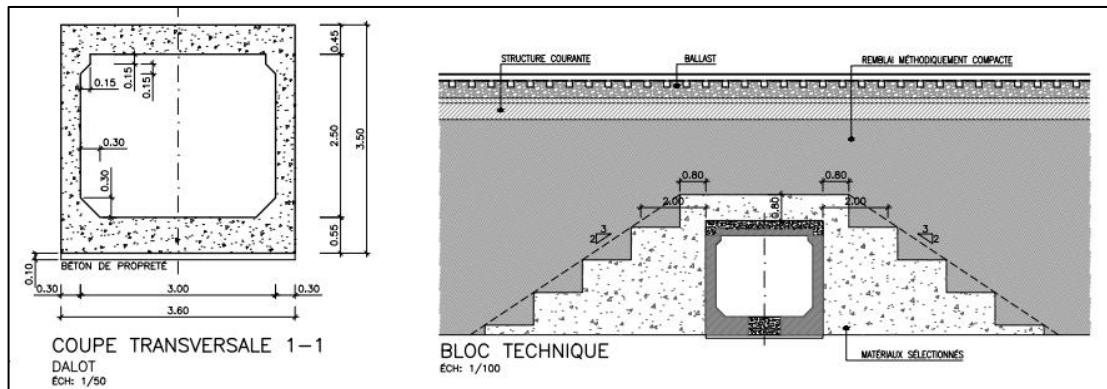


Figure V-10 Ouvrage hydraulique (dalot)

Les dimensions des dalots sont obtenues en faisant l'égalité entre le débit de crue et le débit de saturation.

Dans notre projet, les dalots sont en béton armé, le K_s est de 70.

Les dalots présentent les caractéristiques suivantes :

- B : largeur nette du cadre (m).
- H : hauteur nette (m).
- $0.75 H$: hauteur de remplissage (m).
- R_h : Rayon hydraulique.
- S_m : Section mouillée (m^2).
- P_m : périmètre mouillé (m).

En utilisant la formule de Manning - Strickler :

$$\text{On a: } S_m = 0.75 \times H \times B$$

$$R_h = \frac{0.75 \times H \times B}{1.6H + B}$$

$$Q_s = K_s S_m R_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} = 70 \times (0.75 \times H \times B) \times \frac{0.75 \times H \times B^{\frac{2}{3}}}{1.5H + B} \times I^{\frac{1}{2}}$$

On prend le bassin versant n° 2 dont le débit $Q_{100} = 7.12 \text{ m}^3/\text{s}$

On propose un dalot avec une seule cellule : $H=3$

- $I=1 \%$

Après les calculs itératifs, les valeurs retenues pour les dimensions du dalot sont :

- $H=3\text{m}$
- $B=2\text{m}$

$$Q_s = K_s S_m R h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} = 70 \times 4.5 \times \frac{4.5^{\frac{2}{3}}}{6} \times 0.01^{\frac{1}{2}} = 26,00 \text{ m}^3/\text{s}$$

On vérifie les conditions d'auto-curage :

➤ 1^{ère} condition :

Pour $Q = 0.1 Q_s$ il faut $V > 0.6 \text{ m/s}$

$$R_q = Q / Q_s = 0.1 \text{ et } R_v = V / V_s = 0.64 \text{ alors } V = 0.64 \times 5.78 = 2.24 \text{ m/s}$$

➤ 2^{ème} condition :

Pour $Q = 0.01 Q_s$ il faut $V > 0.3 \text{ m/s}$

$$R_q = Q / Q_s = 0.01 \text{ et } R_v = V / V_s = 0.32 \text{ alors } V = 0.32 \times 5.78 = 1.84 \text{ m/s}$$

➤ 3^{ème} condition :

$$V_s = \frac{7.12}{4.5} = 1.58 < 4 \text{ m/s}$$

Et $Q_{100} < Q_s$, c'est vérifié.

Les conditions d'auto-curage sont vérifiées.

Vérification de la condition pour assurer un écoulement fluvial :

$$H_{cr} = \sqrt[3]{\frac{Q_{ps}}{g \times B^2}} = \sqrt[3]{\frac{26}{9.8 \times 3^2}} = 0.665 \text{ m} < H = 1.6 \text{ m, Vérifié}$$

Tableau V- 11 : Dimensionnement des buses

Bassin versant	PK	Qmax (m ³ /s)	Rugosité Ks	La pente m/m	Diamètre théorique (mm)	Diamètre retenu (mm)	Qps (m ³ /s)	Vps (m/s) <4	Q=0.01Qps Alors V > 0.3 m/s	Q=0.1Qps Alors V > 0.6 m/s	Hauteur de remplissage	0.80 D	Vérification
3	1+062	6.053	70	0.01	1466.21	1500	6.43	3.640	1.16	2.33	1.16	1.2	Vérifié
5	1+350	5.312	70	0.01	1396.08	1500	6.43	3.640	1.16	2.33	1.04	1.2	Vérifié
9	1+938	6.083	70	0.01	1468.93	1500	6.43	3.640	1.165	2.33	1.16	1.2	Vérifié
4	1+150	1.210	70	0.01	801.68	1500	6.43	3.64	1.165	2.330	0.44	1.2	Vérifié
7	1+625	1.780	70	0.01	926.50	1500	6.43	3.64	1.165	2.330	0.54	1.2	Vérifié
8	1+823	2.042	70	0.01	975.39	1500	6.43	3.64	1.165	2.330	0.58	1.2	Vérifié
10	2+073	1.111	70	0.01	776.51	1500	6.43	3.64	1.165	2.330	0.42	0.8	Vérifié
15	6+360	2.594	70	0.01	1067.05	1500	6.43	3.64	1.165	2.330	0.66	0.96	Vérifié
16	6+645	2.938	70	0.01	1118.12	1500	6.43	3.64	1.165	2.330	0.71	0.96	Vérifié
18	7+970	0.540	70	0.01	592.32	1500	6.43	3.64	1.165	2.330	0.30	0.8	Vérifié
20	8+380	0.108	70	0.01	324.21	1500	6.43	3.64	1.165	2.330	0.14	0.8	Vérifié
28	11+822	2.698	70	0.01	1082.89	1500	6.43	3.64	1.165	3.029	0.68	0.96	Vérifié
31	13+130	1.227	70	0.01	805.75	1500	6.43	3.64	1.165	2.330	0.45	0.8	Vérifié
32	13+178	1.477	70	0.01	863.80	1500	6.43	3.64	1.514	2.330	0.49	0.8	Vérifié
33	13+195	2.214	70	0.0169	911.25	1500	8.36	4.73	1.165	2.330	0.53	0.8	Vérifié
34	13+995	1	70	0.01	746	1500	6.43	3.64	1.165	2.008	0.47	0.96	Vérifié
35	14+430	0.780	70	0.01	680.06	1500	6.43	3.64	1.165	2.330	0.35	0.96	Vérifié
36	14+548	0.411	70	0.01	534.54	1500	6.43	3.64	1.004	2.330	0.26	0.96	Vérifié
37	14+567	1.067	70	0.01	764.6147731	1500	3.55	3.14	1.165	2.330	0.45	0.96	Vérifié

V-12: Dimensionnement des dalots

										L'écoulement fluviale		Vérification de la vitesse		Conditions d'auto curage					
N°BV	PK	Q (m ³ /s)	Ks	I m/m	B (m)	H (m)	Sm (m ²)	Pm (m)	Qps (m ³ /s)	Hc	Vérification H>Hc	V (m/s)	V <4 m/s	Vps (m/s)	Vps>1 m/s	V (m/s)	Q=0.01Qps Alors V > 0.3 m/s	V (m/s)	Q=0.1Qps Alors V > 0.6 m/s
1	0+275	34.38	70	0.01	3	2	9	9	63.00	1.475	Vérifié	3.82	Vérifié	7.00	Vérifié	2.240	Vérifié	4.480	Vérifié
2	0+875	7.12	70	0.01	3	2	4.5	6	26.00	1.098	Vérifié	1.58	Vérifié	5.78	Vérifié	1.849	Vérifié	3.698	Vérifié
11	2+350	7.70	70	0.01	3	2	4.5	6	26.00	1.098	Vérifié	1.71	Vérifié	5.78	Vérifié	1.849	Vérifié	3.698	Vérifié
12	2+650	16.01	70	0.01	3	2	4.5	6	26.00	1.098	Vérifié	3.56	Vérifié	5.78	Vérifié	1.849	Vérifié	3.698	Vérifié
21	8+413	0.14	70	0.025	3	2	4.5	6	41.11	1.280	Vérifié	0.03	Vérifié	9.14	Vérifié	2.924	Vérifié	5.847	Vérifié
22	8+505	4.24	70	0.035	3	2	4.5	6	48.43	1.351	Vérifié	0.94	Vérifié	10.76	Vérifié	3.444	Vérifié	6.888	Vérifié
6	1+450	8.91	70	0.01	3	2	4.5	6	26	1.098	Vérifié	1.98	Vérifié	5.778	Vérifié	1.849	Vérifié	3.698	Vérifié
30	12+545	11.75	70	0.033	3	2	4.5	6	47.23	1.34	Vérifié	2.61	Vérifié	10.5	Vérifié	3.356	Vérifié	6.712	Vérifié

Remarque :

- Le premier dalot contient deux cellules, les autres ouvrages hydrauliques ont qu'une cellule.
- Des enrochements de protection sont posés en amont et en aval des ouvrages hydraulique afin de diminuer la vitesse d'écoulement, de protéger ces ouvrages et d'éviter l'érosion.

V.8.2.3. Les ouvrages d'art :

Certains parcours hydrauliques sont traversés par des ouvrages d'art tel que viaduc, vu les débits de crues ou bien la présence d'autre contrainte.

Le tableau suivant montre l'implantation des ouvrages d'art traversant certains parcours hydrauliques.

Tableau V-13 : Implantation des OA traversant certains parcours hydrauliques

BV	PK (BV)	Q100 (m3/s)	Ouvrage d'art	PK (OA)	Longueur OA (m)
13	2+850-3+075-4+645-5+274	15931,98	Viaduc 2-3	2+768 – 3+982	754 - 1840
14	6+138	23.85	Viaduc 4	6+112	225
17	7+390	36.61	Viaduc 5	7+362	200
19	8+316	41.52	Viaduc 6	8+155	175
23	9+058	2.77	Viaduc 7	8+937	130
24	10+240	2.76	Viaduc 8	10+225	278
25	10+360	7.39	Viaduc 8	10+225	278
26	10+650	6.33	Viaduc 9	10+605	95
27	11+500	33.49	Viaduc 10	11+205	566.60
29	12+317	2.44	Viaduc 11	12+100	305

V.8.3. Dimensionnement des ouvrages longitudinaux :

Les ouvrages hydrauliques longitudinaux sont des ouvrages linéaires construits parallèlement à la voie, connus sous forme de fossés qui captent les eaux pluviales ruisselant sur la surface de l'infrastructure ferroviaire ainsi que sur les talus de déblai et de remblai, afin de les acheminer vers un exutoire situé hors de l'emprise, pour la protéger.

Les principes à considérer pour le dimensionnement de ces ouvrages sont les suivants :

- L'écoulement des eaux du drainage longitudinal se fait par gravité.
- Dans les zones de grand déblai, des fossés de crête sont prévus afin d'éviter l'érosion des talus.

- Un dispositif de dissipation d'énergie est nécessaire dans les zones à fort écoulement.

V.8.3.1. Dimensionnement des fossés :

Les fossés sont nécessaires pour drainer les écoulements à surface libre ainsi que les eaux infiltrées dans les structures d'assise pour garantir la pérennité de la voie.

En utilisant la formule de Manning- Strickler :

$$Qs = Ks Sm Rh^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$$

Avec :

- La surface mouillée : $Sm = (b+z.h).h$, $z = 1.622$
- Le périmètre mouillé : $Pm = b + 2h\sqrt{1 + z^2}$
- Le rayon hydraulique : $Rh = \frac{Sm}{Pm}$. Avec z la pente des berges.

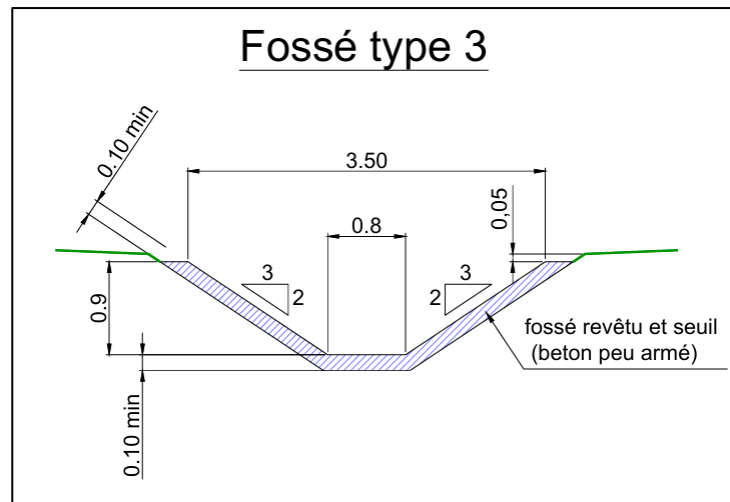


Figure V- 11 Fossé type 3

Hypothèse pour le dimensionnement :

- Coefficient de rugosité $Ks = 65$ (béton lisse)
- Le débit à évacuer est la somme de 3 débits, pour la plateforme, les bermes, et les talus. :
 $Qa = Qpf + Qt + QB$
- La pente des fossés en zone de déblai correspond à celle du profil en long de la voie
- En utilisant la méthode rationnelle :

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3.6}$$

Q (m3/s) : Débit de crue correspondant au bassin versant

C : Coefficient de ruissellement

I (m/m) : Pente longitudinale.

A (Km²) : Surface du bassin versant considéré (la plateforme – les talus – la berme).

Tableau V-14 : Débit à évacuer par le fossé

		Déblai (cas plus défavorable)		
		Hmax = 28.78 m Longueur = 1150 m Demi largeur de la plateforme= 6.8 m		
	Formule	Plateforme	Talus	Banquettes
S(Km2)	$A = d \times l$	0.0085884	0.100754	0.0046
I (%)	-	0.04	3/2	0.04
Cr	-	0.8	0.5	0.5
Tc(h) (Petits bassins)	$TC = 0.127 \sqrt{\frac{S}{I}}$	0.0588	0.032915	0.04306
I(mm/h)	$I(t, T) = \frac{a(T)}{t^{0.7}}$ a=36.6	266.02	399.305	330.848
Q(m3/s)	$Q = \frac{C \times I \times A}{3.6}$	0.5077	5.5877	0.2114
Qtotal (m3/s)	$Q_{pf} + Q_t + Q_B$	6.3068		
Qps (m3/s)	$Q_s = K_s S_m R h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$	10.1339		
Type de fossé	-	Type 3		
Vérification	$Q_{ps} > Q_{TOTAL}$	Oui		
	$V_{ps} \text{ (m/s)}$	4.98 (Acceptable)		

Tableau V- 15 : Dimensionnement du fossé type 3

b	B	h	Z	Sm (m²)	Pm (m)	Rh (m)	Ks	I (%)	Qps	Vps
0.8	3.5	0.9	1.622	2.0338	4.2298	0.4808	65	1.56	10.13	4.98

La vitesse d'écoulement doit être minimiser avec des dispositifs tels que des caniveaux et demi buses posés dans les banquettes et avec végétalisation des talus pour quelle sera inférieur à 4 m/s afin de protéger l'ouvrage hydraulique.

Les fossés de crête interceptent les eaux de ruissellement en amont des talus afin de prévenir l'érosion, d'assurer la stabilité des talus et de protéger la plateforme ferroviaire.

V.9. Conclusion :

En résumé, ce chapitre a permis d'étudier les aspects hydrologique et hydrauliques du projet, en évaluant les débits et en dimensionnant les ouvrages nécessaires. Il met en évidence l'importance de dimensionnement pour assurer la sécurité, limité les risques d'inondation et garantir la durabilité de l'infrastructure ferroviaire.

Chapitre VI : Etude géologique et géotechnique

VI. Etude géologique et géotechnique :

VI.1. Introduction :

L'étude géologique et géotechnique constitue une étape fondamentale dans la conception et la réalisation des projets d'ingénierie. Elle vise à caractériser les propriétés des sols et des formations rocheuses afin de proposer des solutions techniques adaptées et sécurisées.

La géologie permet d'identifier les aléas naturels, tels que les risques sismiques, tandis que la géotechnique analyse le comportement des terrains afin d'évaluer la stabilité des fondations et des ouvrages.

La combinaison de ces deux disciplines permet ainsi de concevoir des solutions optimisées, garantissant la sécurité, la durabilité et la performance des infrastructures.

VI.2. Étude géologique :

VI.2.1. Le cadre géologique général :

Cette voie ferrée objet du présent projet entre Ksar El Boukhari et Boughezoul totalise un linéaire approximatif de 42 km.

La zone d'étude est localisée, géologiquement, autour du Domaine Alpin, entourée par le Complexe des Nappes Telliennes et l'Atlas Plissé, parcourant approximativement, du Nord au Sud, l'Atlas Tellien, les Hauts Plateaux et les contreforts septentrionaux de l'Atlas Saharien, et se terminant près du massif de Djebel Senalba.

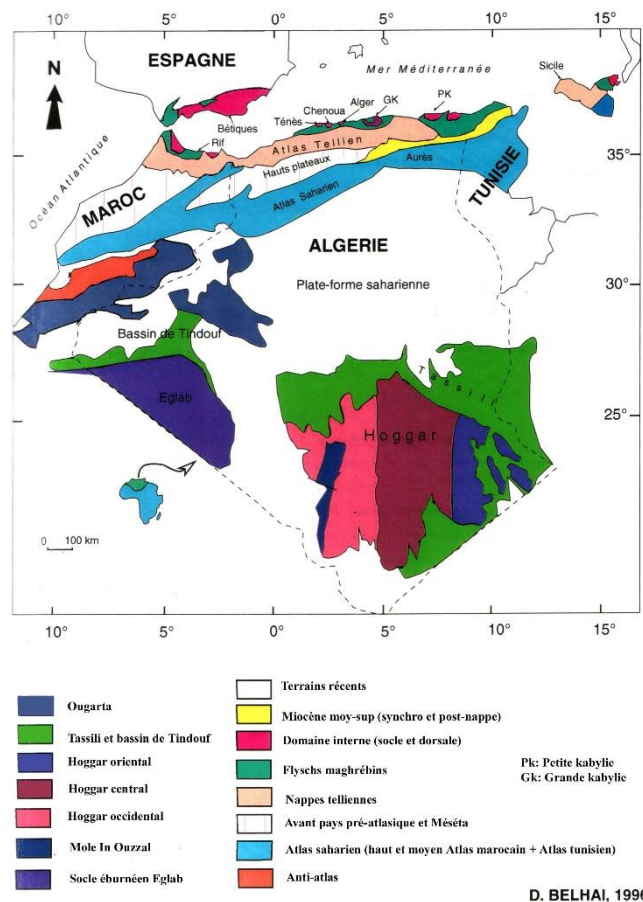


Figure VI – 1 Grands traits géologiques de l'Algérie

La région Boumedfaa–Djelfa repose sur trois ensembles géologiques :

1. **Domaine Tellien (Nord)** : relief plissé formé par des nappes de charriage du Miocène sur des terrains plus anciens.
2. **Hauts Plateaux (Sud de Boughezoul)** : affleurements mio-plio-quaternaires et transition vers l'Atlas Saharien.
3. **Atlas Saharien (Est)** : est un relief élevés constitué de sédiments du Trias à l'Éocène et séparés des Hauts Plateaux par l'Accident Sud Atlasique (ASA).

VI.2.2. Stratigraphie régionale :

La stratigraphie du Nord de l'Algérie reflète une sédimentation du Mésozoïque au Quaternaire dans un bassin bordant un socle paléozoïque fracturé. Les dépôts vont des évaporites et grès du Trias, aux calcaires et dolomies du Jurassique, aux marnes, carbonates et flysch du Crétacé, puis aux marnes, grès et calcaires du Cénozoïque. Les sédiments quaternaires alluviaux et dunaires complètent la succession, formant les plaines et vallées actuelles.

VI.2.3. Tectonique :

L'évolution tectonique du Nord de l'Algérie résulte de la convergence Afrique-Europe depuis le Jurassique, avec des phases de plissement, d'ouverture de l'Atlantique et de réactivation tectonique au Mésocène-Cénozoïque. Depuis le Mio-Pliocène jusqu'au Quaternaire, la région connaît une relative stabilité crustale avec quelques ajustements néotectoniques localisés.

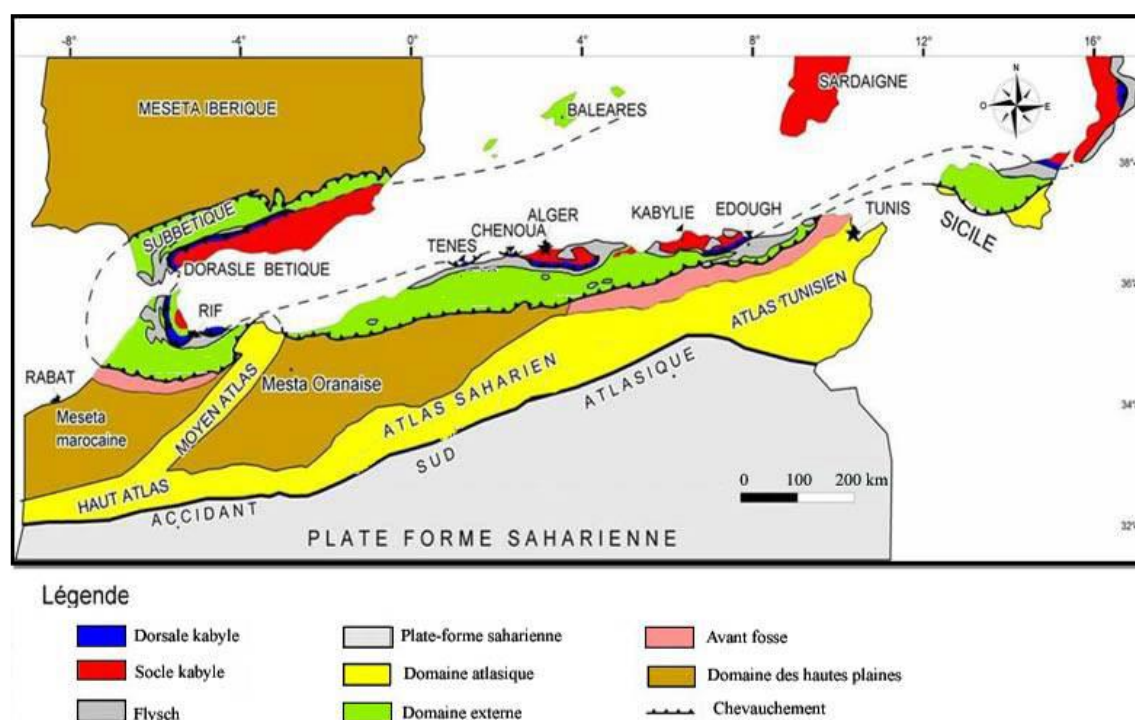
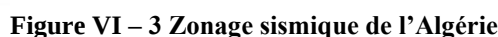


Figure VI – 2 Carte tectonique de l'Algérie du nord

Le territoire national est divisé en sept (07) zones sismiques selon le RPA 2024, Ces zones sont indiquées sur la carte de zonage sismique de l'Algérie présentée ci-dessous :



VI.2.4. Géomorphologie :

VI.2.5. Hydrogéologie :

VI.2.6. Division géologique du tracé :



ENSTP
الدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا
École Nationale Supérieure des Techniques Publics
National School of (Civil and General) Works Engineering

Le tracé s'appuie sur des marnes du Crétacé supérieur surmontées par des marnes séléniteuses de transition vers le Paléocène, partiellement recouvertes par les alluvions de l'Oued Chélif, caractérisant le tronçon jusqu'au PK 4+000.

Au-dessus, les matériaux du Miocène inférieur se présentent en trois faciès : marnes sableuses grises avec grès et calcaires, bancs de grès et conglomérats sur les versants, et argiles rouges continentales, couvrant partiellement le tronçon PK 4+000 à PK 10+000 et recouverts par les alluvions récentes de l'Oued Chélif.

Entre les P.K. 10+000 et 13+000, les matériaux caractéristiques sont les alluvions récentes de la vallée de l'Oued Bou Kmouri, composés des sables, limons et argiles.

Entre les PK 13+000 et 14+500, le tracé traverse une structure synclinale Eocène-Oligocène à flancs doux, comprenant calcaires à Nummulites, grès, marnes grises et lumachelles, marnes noires séléniteuses, argiles rouges avec gypse et grès de Boughari.

Du P.K. 14+500 jusqu'au P.K. 15+000 l'unité de transition Crétacé supérieur – Paléocène est traversée. Elle est composée par des marnes olivâtres séléniteuses, partiellement recouvertes par des alluvions récentes du fond des talwegs.

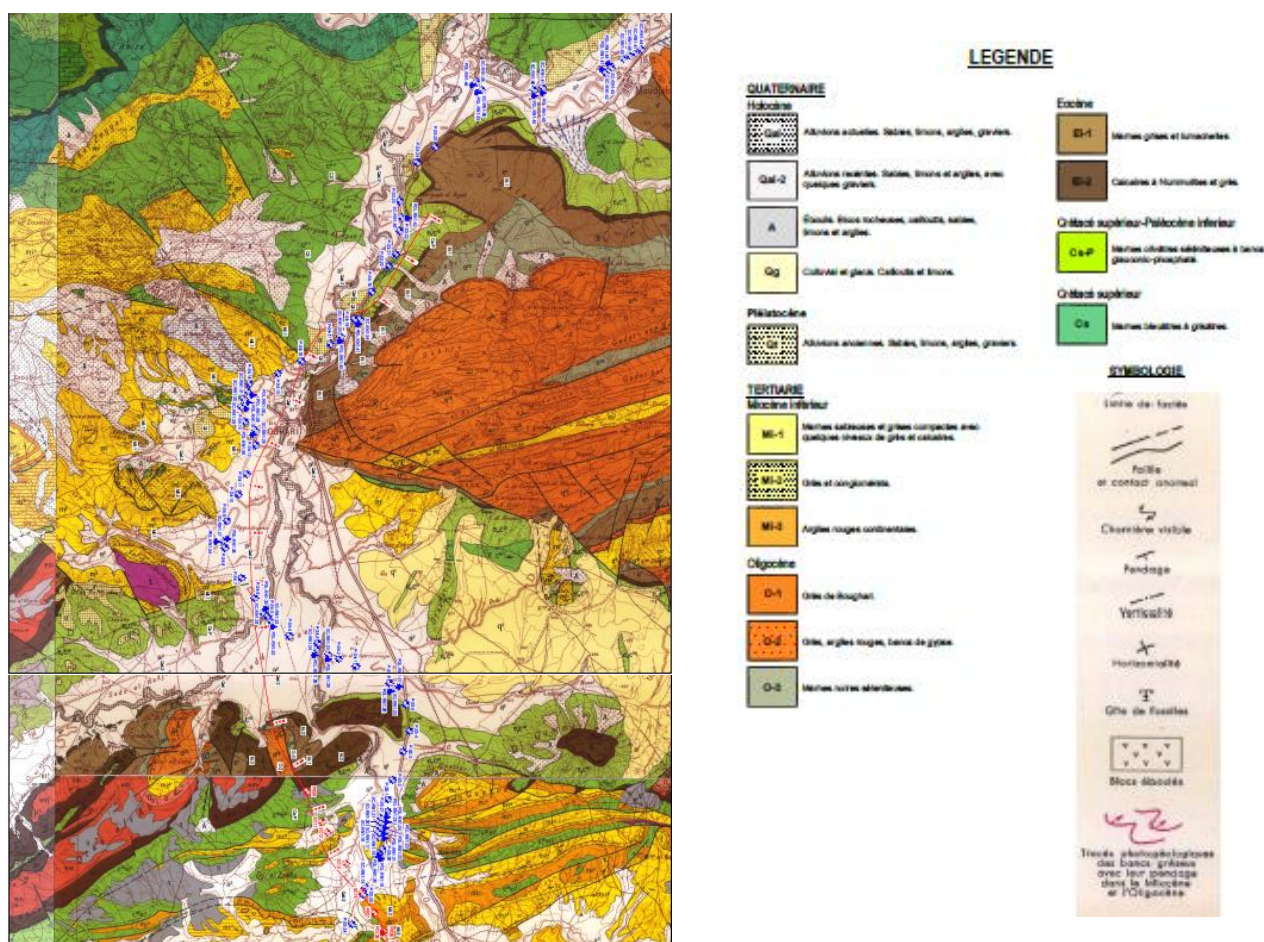


Figure VI – 4 Plan géologique et géotechnique (Ech : 1/25.000)

VI.2.7. Lithologies touchées par le tracé de la voie ferrée :

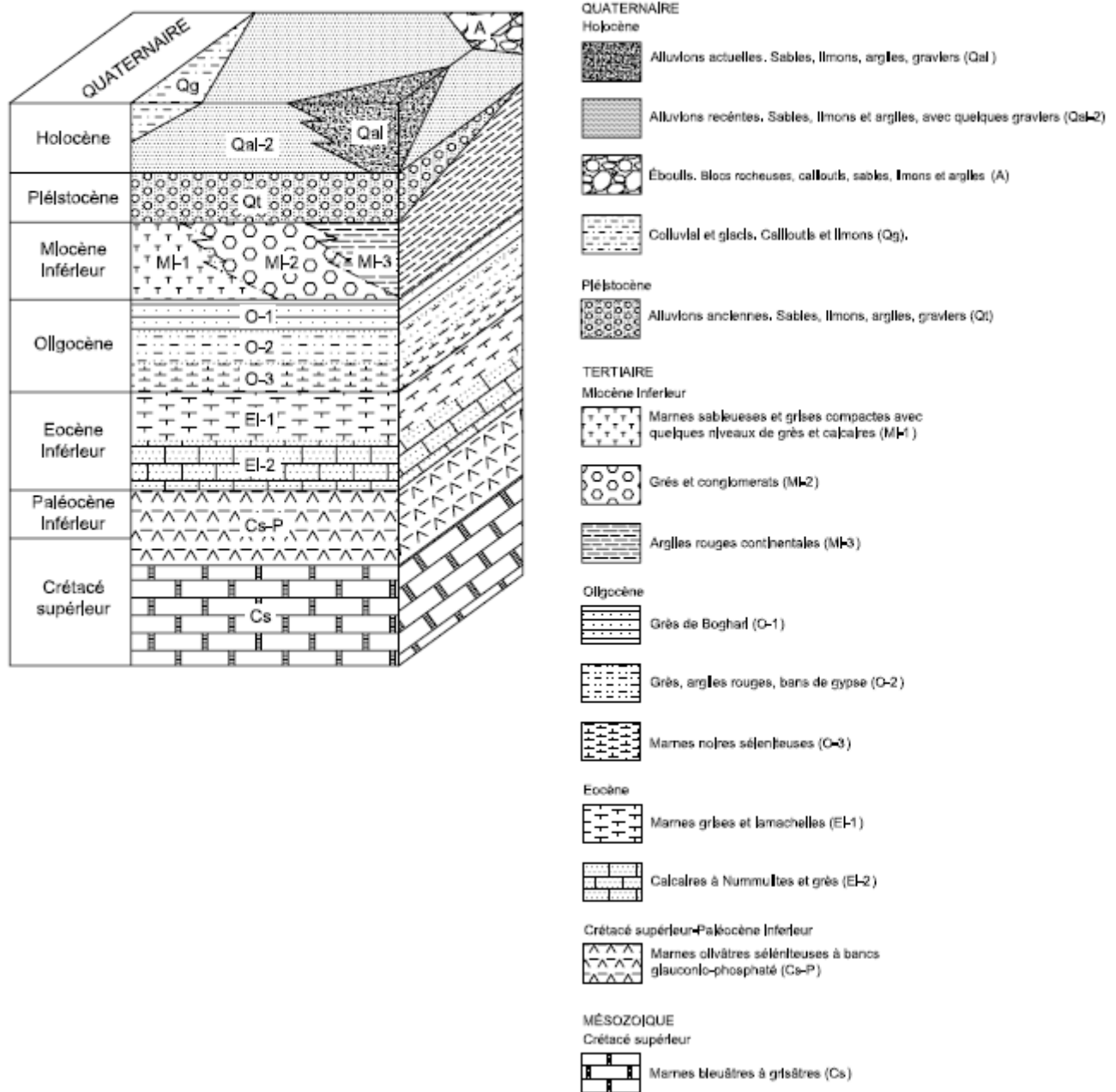


Figure VI - 5 Colonne stratigraphique des lithologies touchées par le tracé

- CRÉTACÉ SUPÉRIEUR (Cs). Série marne-calcaire.
- CRÉTACÉ SUPÉRIEUR -PALÉOCÈNE, (Cs-P). Marnes verdâtres à bancs glauconio phosphaté.
- ÉOCÈNE INFÉRIEUR, (EI-2). Calcaires à Nummulites et grès.
- ÉOCÈNE INFÉRIEUR, (EI-1). Marnes noires et lumachelles.
- OLIGOCÈNE, (O-3). Marnes noires séléniteuses.
- OLIGOCÈNE, (O-2). Grès, argiles rouges et bancs de gypse.
- OLIGOCÈNE, (O-1). Grès de Boghari.
- MIOCÈNE INFÉRIEUR, (MI-3). Argiles rouges continentales.
- MIOCÈNE INFÉRIEUR, (MI-2). Grès et conglomérats.

- MIOCÈNE INFÉRIEUR, (Mi-1). Marnes sableuses et grises compactes avec niveaux de grès et calcaires.
- QUATERNAIRE (Qt). PLÉISTOCÈNE. Alluvions anciennes. Sables, limons, argiles et graviers.
- QUATERNAIRE (Qg). HOLOCÈNE. COLLUVIAL ET GLACIS. Cailloutis et limons.
- QUATERNAIRE (A). HOLOCÈNE. ÉBOULIS. Blocs rocheux, cailloutis, sables, limons et argiles.
- QUATERNAIRE (Qal-2). HOLOCÈNE. ALLUVIONS RÉCENTES. Sables, limons et argiles, certains des graviers.
- QUATERNAIRE (Qal). HOLOCÈNE. ALLUVIONS ACTUELLES. Sables, limons, argiles, graviers.

VI.3. Etude géotechnique :

L'étude géotechnique a pour objectif de déterminer les caractéristiques mécaniques et géologiques des sols afin d'orienter la conception et la réalisation des ouvrages. Elle repose sur des investigations comprenant l'identification des formations en place, la réalisation d'essais in situ et en laboratoire, ainsi que l'élaboration de recommandations techniques visant à assurer la stabilité, la sécurité et la durabilité des infrastructures.

VI.3.1. Travaux de reconnaissance :

Dans cette partie sont énumérés les différents travaux réalisés dans la campagne géotechnique et les essais de laboratoire proposés.

VI.3.1.1. Reconnaissance in-situ :

Des travaux géotechniques sont effectués en phase APD, La zone d'étude objet a comporté l'exécution des sondages et essais in-situ suivants :

- Des puits de reconnaissance réalisés en phase ADP du projet allant jusqu'à 3m de profondeur.
- Des essais de pénétromètre dynamique réalisés en phase ADP.
- Des sondages carottés réalisés en phase APD du projet de différentes profondeurs allant jusqu'à 20 m avec prélèvements d'échantillons intacts et remaniés pour des essais de laboratoire.

Les travaux de reconnaissance réalisés sont abrégés comme suit :

➤ Sondage mécanique: (SC)

Les sondages carottés sont réalisés à l'aide des machines de forage pour identifier la lithologie du sol et mesurer la profondeur de la nappe d'eau.

➤ Pénétromètre dynamique: (PD)

Consiste à enfoncer des tiges métalliques et de compter le nombre de coups nécessaire pour atteindre une certaine profondeur pour déterminer les couches porteuses et évaluer la résistance du sol.

➤ Puits de reconnaissance: (PR)

Des trous creusés à la machine pour observer directement les couches et prélever des échantillons pour des essais mécaniques au laboratoire.

- Essai pénétromètre dynamique (PDL) :

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau VI-1 : Résultats des essais de pénétromètre dynamique (PDL)

N° sondage pénétrométrique	PK	Variation de la résistance à la pénétration R_p en (bar) selon la profondeur	Profondeur de refus (m)
PDL-32	10+026	0.2-5m : $R_p > 100$	5
PDL-33	9+603	0.2-3.8m : $R_p > 100$	3.8
PDL-34	8+159	0.2-1.4m : $R_p > 100$	1.4
PDL-35	8+109	0.2-1.8m : $R_p > 100$	3.2
PDL-36	6+030	0.2-2.2m: $R_p > 100$ / 2.2-3m : $80 < R_p < 100$ / 3-5.4m: $R_p > 100$ / 5.4-7.6m: $60 < R_p < 100$ / 7.6-8.2m: $R_p > 100$	8.2
PDL-37	5+611	0.2-2.2m : $R_p > 100$	2.2
PDL-38	5+469	0.2-3.8m : $R_p > 100$	3.8
PDL-39	5+293	0.2-2m : $R_p > 100$	2
PDL-40	3+237	0.2-4.2m : $R_p > 100$	4.2
PDL-41	2+644	0.2-1.7m: $20 < R_p < 100$ / 1.7-2.1m: $R_p > 100$ / 2.1-2.8m: $80 < R_p < 100$ / 2.8-5.6m: $R_p > 100$	5.6
PDL-42	0+279	0.2-8.1m : $20 < R_p \leq 100$ / 8.1-12m : $R_p \geq 100$	12

VI.3.1.2. Reconnaissance au laboratoire :

Les échantillons intacts et remaniés prélevés dans les puits de reconnaissance et les sondages carottés à différentes profondeurs ont fait l'objet d'analyse en laboratoire par réalisation des essais suivants :

- Essai physique :
 - Analyses granulométriques.
 - Les limites d'Atterberg.
 - Teneur en eau.
 - Densité.
 - Indice CBR.
 - Proctor modifié.

- Essais mécaniques :
 - Détermination des caractéristiques mécaniques de résistance au cisaillement à la boîte de Casagrande :
 - 1- Cohésion interne apparente du sol (C)
 - 2- Angle de frottement apparent du sol ϕ .
 - Détermination des caractéristiques mécaniques de compressibilité à l'œdomètres :
 - 1- Pression de consolidation (P_c)
 - 2- Indice de compression (C_c)
 - 3- Indice de gonflement (C_g)



Investigations géotechniques de la ligne ferroviaire Boughezoul – Ksar El Boukhari
Sondage SC11 – Caisse N°1 : 0.00 – 7.50 m



Investigations géotechniques de la ligne ferroviaire Boughezoul – Ksar El Boukhari
Sondage SC11 – Caisse N°2 : 7.50 – 15.00 m

Figure VI – 6 Sondage carotté SC-11 au PK 14+286 (0.00m - 15.00m)

VI.3.2. Synthèse des résultats géotechniques :

Les tableaux ci-dessous présentent un résumé des essais de laboratoire sur les échantillons récupérés des puits de reconnaissance et des sondages carottés réalisés en APD :

CHAPITRE VI : Étude géologique et géotechnique

Puits	Groupe	Analyse granulométrique		Plasticité			Etat naturel				Proctor modifié			Classification selon l'agressivité chimique (NA16002)	Classification	
		<2mm	<0.08mm	Wl	Wp	Ip	W (%)	CaCo3 (%)	So4 (%)	Cl ⁻ (%)	γ'_{max} (t/m ³)	W(%)	ICBR (100%)		GTR	UIC
P-S3-20	Qal-2	98	87	31	15.3	15.7	20	-	-	-	-	-	-	-	A2	QS1
P-S3-21	Qal-2	97	86.7	63.3	31.3	32	21.4	17.8	0.23	4.64	1.79	14.2	1.24	XA2	A3th	QS1
P-S3-22	Qal-2	98	93	65.9	32.6	33.3	14.1	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
P-S3-23	Qal-2	98	89	61.2	30.1	31.1	20.3	19.49	0.23	3.46	1.73	17.6	1.63	XA2	A3m	QS1
P-S4-06	Qal-2	95	59	61	37.6	23.4	23.6	-	-	-	-	-	-	-	A2	QS1
P-S4-07	Qal-2	100	100	48.9	19.9	29	13.8	24.58	0.12	Traces	2.11	11.3	0.55	XA1	A3h	QS1
P-S4-08	Qal-2	100	98	49.8	20.8	29	21.8	-	-	-	2.09	8.7	1.1	-	A3th	QS1
P-S4-09	Qal-2	100	59	31.4	18.2	13.2	9.9	28.81	0.12	Traces	1.97	9.6	3.8	XA1	A2m	QS1
P-S4-10	Qal-2	100	98	50.6	18.8	31.8	16.2	-	-	-	1.87	10.8	1.26	-	A3th	QS1
P-S4-11	Qal-2	98	93	36.7	15.5	21.2	13.3	27.12	0.12	Traces	1.92	11.9	-	XA1	A2h	QS1
P-S4-12	Qal-2	100	99	58.8	21.9	36.9	41.6	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
P-S4-13	Mi-1	97	90	67.4	-	35.6	19.5	20.34	0.17	2.72	1.79	14	5.58	XA1	A3h	QS1
P-S4-14	Mi-1	99	94	53.8	-	35.9	16.1	-	-	-	1.94	11.3	2.3	-	A3th	QS1
P-S4-15	Qal-2	71	47	71.9	35.4	36.5	11.1	-	-	-	2.01	8.4	1.66	-	A3h	QS1
P-S4-16	Qal-2	98	85	36.8	18.4	18.4	12.3	-	-	-	-	-	-	-	A2	QS1

P-S4-17	Qt	99	84	39.7	21.6	18.1	13	21.18	0.23	Traces	1.81	14.9	1.14	XA2	A2s	QS1
P-S4-18	Qt	40	18	45.9	22.5	23.4	14.4	-	-	-	2.08	8	1.66	-	B6th	QS0
P-S4-19	Qal-2	99	92	71.4	34.9	36.5	22.5	11.86	0.18	Traces	-	-	-	XA1	A3	QS1

Tableau VI-2 : Résultats géotechnique sur les puits de reconnaissance

Sondage	Pi-Pf (m)	Analyse granulométrique		Plast- -icité	Etat naturel				Contenus			Classificati- -on selon l'agressivit -é chimique (NA16002)	Comp Uni-ax	Cisaillement direct / tri- axial			Oedomètre			Classificati- on	
		<2mm	<0.08 mm		W (%)	Densité sec (g/m³)	γ _{ap} (t/m³)	Sr (%)	CaCO 3 (%)	SO4 (%)	CL ⁻ (%)		Qu (Kg/Cm²)	Type	C'	Ø'(kg/ cm²)	Pc (kg/ cm²)	Cc (%)	Cg (%)	GTR	UIC
SC-RN1-26	5.35-5.85	99.8	95.4	46.1	24.7	1.64	2.05	100	23.28	4.86	0.76	XA3	-	-	-	-	-	-	-	A4	QS1
SC-RN1-26	8-8.4	99.8	95.6	25.4	19.1	1.75	2.09	94.84	-	-	-	-	-	UU sat	0.55	4.77	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-26	12.65-13	100	87.4	25.1	16.2	1.75	2.04	80.53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-26	16.3-16.85	99.6	78.4	31.5	24.3	1.65	2.05	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-27	1.5-1.9	100	91.8	24.4	19.7	1.65	1.98	83.53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A2	QS1
SC-RN1-27	5-5.4	100	93.2	23.1	17.6	1.72	2.02	21.14	-	-	-	-	-	UU sat	0.81	6.96	-	-	-	A2	QS1
SC-RN1-27	9.5-9.9	98.5	96.1	23.6	13.9	1.99	2.27	100	-	-	-	-	3.6	-	-	-	-	-	-	A2	QS1
SC-RN1-28	3.3-3.7	97.5	64.6	31.6	17.2	1.80	2.11	92.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-28	9.5-9.8	100	98.3	37.7	23.9	1.57	1.95	89.92	-	-	-	-	-	UU sat	0.4	12.02	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-29	3.3-3.85	88.7	64	30.4	17.6	1.70	2.01	80.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1

SC-RN1-29	8.4-8.6	95.1	90.2	26.3	27.8	1.53	1.96	97.95	-	-	-	-	-	UU sat	0.24	15.7	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-29	11.3-11.6	97.9	93.3	23.4	13.5	2	2.27	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A2	QS1
SC-RN1-30	6.3-6.7	89	69.7	23.7	15.2	1.73	2	73.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A2	QS1
SC-RN1-30	8.7-9.1	97.1	78.1	16.4	17.6	1.8	2.12	94.82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A2	QS1
SC-RN1-30	13-13.35	97.5	93.8	27.2	16.9	1.83	2.14	95.86	-	-	-	-	-	UU sat	0.96	19.62	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-31	2.5-2.75	85.7	69.9	25.5	12	1.98	2.22	88.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-31	4-4.5	95.3	81.6	23.6	13.6	1.93	2.2	91.49	-	-	-	-	-	UU sat	0.84	10.76	-	-	-	A2	QS1
SC-RN1-33	2.35-2.75	100	94.5	26.9	25.3	1.61	2.02	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-33	6.7-7.1	100	80.8	20	22.5	1.68	2.06	100	-	-	-	-	-	UU sat	0.72	14.44	-	-	-	A2	QS1
SC-RN1-34	4.5-4.8	96.4	69.7	24	17.4	1.73	2.03	83.63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A2	QS1
SC-RN1-34	11.4-11.9	93.5	57	27.5	17.8	1.73	2.04	86.41	-	-	-	-	-	UU sat	0.36	20.81	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-34	13.7-14	88.2	25.2	27.5	23.8	1.64	2.03	99.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS0
SC-RN1-36	4.25-4.6	99.2	91.7	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-36	9-9.3	97.8	89	31.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
SC-RN1-36	11.4-11.85	99	88.3	37.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
SC-11	1.5-1.95	99.8	90.2	31.4	-	-	-	-	12.4	trace	0.39	XA1	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
SC-11	6-6.2	99.8	94	26.3	28	1.48	1.89	91.4	19.47	trace	0.32	XA1	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
SC-11	11.85-12	100	99.3	26.5	21.1	1.7	2.06	96.48	-	-	-	-	-	-	-	-	1.03	17.43	3.14	A3	QS1
SC-12	1.5-1.95	99.2	88.6	31.6	-	-	-	-	13.27	6.34	0.46	XA3	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1

SC-12	13.5-13.9	99.9	97.8	34.6	28	1.38	1.75	78.95	21.24	5.32	0.35	XA3	-	-	-	-	-	-	-	A3	QS1
-------	-----------	------	------	------	----	------	------	-------	-------	------	------	-----	---	---	---	---	---	---	---	----	-----

Tableau VI-3 : Résultats géotechnique sur les sondages carottés

Référence ou origine	PK	Profondeur (m)	Type d'échantillon (Remanié-Intact)	Unité géologique	Granulométrie			Limites d'Atterberg %		VBS	W _n (%)	Classification	
					2mm	0.42 mm	0.074 mm	LL	IP			GTR (LCPC/SETRA)	UIC 719R
S105	9+625	7-7.4	I	Cs-P	99.36	98.26	97.79	56	28	-	12	A3	QS0
S106	9+850	14.3-14.7	I	Qt/Cs-P	99.41	93.26	78.69	44	22	-	30	A2th	QS1
P116	10+225	0.3-3	R	Qal-2	96.27	91.06	89.42	52	26	1.92	-	A3/A2	QS0
P117	11+100	1.4-3	R	Qal-2	97.46	87.86	74.26	47	23	1.5	-	A2	QS1
P118	12+050	0.2-1.4	R	Qal-2/O-2	97.26	86.66	72.84	45	22	1.6	-	A2	QS1
P119	12+850	1.2-2.8	R	O-2	95.91	91.93	87.83	50	25	2.4	6	A2/A3ts	QS1
P120	12+925	0.5-3	R	O3	97.07	84.61	72.5	45	23	1.32	-	A2	QS1
P121	13+075	0.3-2.9	R	Ei-1/O-2	99.15	94.88	81.7	51	25	1.2	-	A2/A3	QS0

Tableau VI-4 : Résultats géotechniques complémentaires sur certains sondages et puits

VI.3.2.1. Interprétation des résultats :

Les sols trouvés sont globalement des sols fins moins sableux à argileux de sous-classe A3 et A2 et A4 d'après la classification GTR, le diamètre maximum (D_{max}) est inférieur à 50 mm avec un pourcentage des passants à 80 μm allant de 47 % jusqu'à 100 pour les puits de reconnaissance et de 25.2 % jusqu'à 100 pour les sondages carottés.

Les sols de sous-classe A3 sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où la difficulté de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire), alors que les sols classés comme A2 se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement si la teneur en eau n'est pas trop élevée

Ces sols sont sensibles à l'eau et peuvent posées des problèmes d'avancement des travaux à cause de leur importante humidité nécessitant un drainage préalable ou leur sécheresse nécessitant un compactage intense.

D'après les conditions d'utilisation de ces sols, ils sont inutilisables à l'état trop secs ou trop humide.

D'après les limites d'Atterberg, le sol est peu plastique à très plastiques.

Selon la classification UIC les sols sont majoritairement de classe QS1.

Dans les zones de déblai et de remblai, une portance minimale de 45 MPa est exigée pour les hauteurs dépassant 8 m. En présence d'un sol QS0, une purge progressive par passes de 30 cm, jusqu'à une profondeur maximale de 2 m, est réalisée afin d'obtenir un EV2 supérieur à 30 MPa avant la mise en œuvre des couches d'amélioration permettant d'atteindre la portance requise.

VI.3.2.2. Agressivité du sol :

D'après les analyses chimiques le sol présente une agressivité faible à moyenne globalement et forte dans certaines zones. Par conséquent, des précautions sont nécessaires dans les zones qui présentent une forte agressivité lors de la fabrication du béton pour les infrastructures.

Pour diminuer l'influence de sulfate sur le béton, il est nécessaire d'utiliser le ciment résistant au sulfate (C.R.S), de choisir une classe de résistance minimale pour le ciment, et de faire un dosage minimal en ciment et d'un rapport eau/ciment optimal.

Un enrobage adéquat des armatures est essentiel pour empêcher leur corrosion.

En appliquant ces méthodes, les risques de dégradation du béton des infrastructures en contact avec le sol seront réduits garantissant ainsi une durabilité et une stabilité à long terme.

VI.3.3. Gîtes d'emprunts et carrière :

L'étude de disponibilité des matériaux dans les zones voisines au tracé prévu comporte trois (3) gîtes de matériaux régional, six (6) emprunts prochains, et six (6) gisements-carrières.

➤ Emprunts :

Dans le cadre du projet, a été élaboré une synthèse des gîtes d'emprunt et carrières pour agrégats afin d'orienter le maître de l'ouvrage sur les capacités de la région en matériaux de remblais.

- Gites régionales à matériaux :

1- Région de Bougezoul :

Elle est située à 5 km du P.K. 39+000 et à 7,5 km du P.K. 33+500. La partie nord est constituée par des alluvions récentes entourées par des formations d'âge Miocène inférieur représentées en grande partie par des roches meubles (marne et argile parfois marneuse) dans lesquelles intercalent des bans de grès grossiers, d'ordre métrique à centimétrique qui donnent des reliefs bien définis et quelques affleurements de marne verdâtre d'âge Paléocène. La partie sud est essentiellement Quaternaire, représentée par les alluvions récentes anciennes constituées par des roches meubles (sable et argile).

Les résultats d'analyses en laboratoire montrent :

Granulométrie : L'analyse granulométrique des différents échantillons montre une hétérogénéité des échantillons prélevés. Le pourcentage des passants 80µm varient entre 18%, et 79%.

Limites d'Atterberg : Les limites de liquidité de ces matériaux varient entre 38.2 et 40.12%, pour des indices de plasticité de l'ordre de 20%.

Optimum Proctor modifié : Les résultats de ces essais montrent que la densité optimum varie de 1.48 à 1.61 t/m³, pour une teneur eau variant entre 14.9 et 18.10%.

Essai CBR : Les résultats des essais CBR, confirment l'hétérogénéité des matériaux analysés. En effet, les valeurs de l'indice CBR varient de 3 à 40.

2- Région de Chahbounia :

Elle est située à 32 km du P.K. 33+500. La localité de Chahbounia présente une réserve importante en matériau de remblai. Il s'agit d'un faciès marin, de nature calcaire (tuf), constitué du sable graveleux avec cailloux et galets, de couleur blanchâtre à jaunâtre. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 4.00m de profondeur.

Les résultats des différentes analyses montrent :

Granulométrie : L'analyse granulométrique des différents échantillons prélevés, montre que le matériau se trouve dans les classes C1A1, C1B5 et C1B6. Le pourcentage des fines (<80µm), varie de 14 et 35 %.

Limites d'Atterberg : Les limites de liquidité de ces matériaux varient entre 21 et 43%, tandis que les indices de plasticité oscillent de 8 à 24%.

Optimum Proctor modifié : Ces essais montrent que la densité optimum varie entre 1.75 et 1.98 t/m³, quant à la teneur en eau, elle varie de 6 à 15%.

Essai CBR : Les essais CBR, montrent que le matériau présente des indices CBR très élevés. Ces derniers sont supérieurs à 25.

3- Région de Ain Ouessara :

Elle est située à 28 km du P.K. 39+000. Cette région est caractérisée par des formations meubles argileuses et sableuses du Quaternaire continental, on y trouve également des dépôts lacustres du Pliocène continental affleurant dans la région Nord et Nord-Ouest d'Ain Ouessara. Le site étudié est constitué par des formations carbonatées d'origine marines (calcaire blanchâtre), représenté par une formation sableuse, finement argilo-limoneuse, avec graviers et cailloux et rares galets. Cette formation est très répandue dans cette région et présente une réserve importante.

Les résultats obtenus indiquent ce qui suit :

Granulométrie : L'analyse granulométrique des différents échantillons montre une hétérogénéité des échantillons prélevés. En effet, le pourcentage des passants à 80µm varie de 29% à 41%.

Limites d'Atterberg : Les limites sont non mesurables. Les essais VBS montrent une valeur de l'ordre de 0.50 pour l'ensemble des échantillons.

Optimum Proctor modifié : Les résultats de ces essais montrent que la densité optimum varie de 1.65 à 1.86 t/m³, pour une teneur en eau variant entre 16 et 18%.

Essai CBR : Les résultats des essais CBR montrent l'hétérogénéité des matériaux analysés. Les valeurs de l'indice CBR varient de 70 à 90.

- Gîtes à matériaux d'emprunts prochaines :

Dans un rayon inférieur à 0,5 km du tracé, ils sont proposés un total de six (6) emprunts. Presque toute la totalité des emprunts (4 de 6) sont constitués par des matériaux qui appartiennent à la formation alluvions anciennes, Qt. Les emprunts 5 et 6 sont constitués par des matériaux sable-argileuses du Plio-quaternaire, Pl, (en dehors de ce tronçon). La caractérisation de ces zones d'emprunts a été réalisée grâce aux reconnaissances tout le long du tracé des formations dites. Dans le cadre suivant on indique la situation, la distance par rapport au tracé de chaque emprunt, et la possible exploitation des emprunts.

Emprunt	Coordonnées		Distance tracé (Km)	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Formation UIC	Situation actuelle
	X	Y					
E-1T1B	479787	3976234	À 0,530 km du PK 0+000	281.670	845.000	Qt QS1	Culture sèche
E-2T1B	478310	3974033	À 0,300 km du PK 2+000	198.000	594.000	Qt QS1	Culture sèche
E-3T1B	477703	3973077	À 0,300 km du PK 3+350	249.100	747.300	Qt QS1	Culture Sèche/Friche
E-4T1B	474510	3973077	À 1,30 km du PK 5+500	249.100	747.300	Qt QS1	Culture Sèche/Friche

E-5T1B	493660	3952196	À 6,5 km du PK 40+640	294.223	882.669	PI QS1	Culture Sèche/Friche
E-6T1B	494957	3947030	À 9,5 km du PK 40+640	463.608	1.390.824	PI QS1	Culture sèche

Tableau VI-5 : Localisation et volumes d'exploitation des emprunts

➤ **Carrières :**

Concernant les carrières, qui se trouvent proches au tracé, dans lesquelles s'extraient et traitent des calcaires blanchâtres à grisâtres, plus ou moins dur ou avec présence de passages marneux. Ces carrières sont les suivantes:

A – Carrière de Boughezoul : Le gisement objet de cette étude est une formation marine constituée par des calcaires blanchâtres à grisâtres durs, dont les couches se pendent vers l'Est avec une direction N-S. La partie superficielle du gisement est légèrement altérée.

B – Carrière de Berrouagua : Il s'agit d'un même massif représenté par de bancs d'épaisseur métriques, de nature calcaire grisâtre parfois jaunâtre, généralement peu altéré, friable en surface et assez dur en profondeur. On note la présence de passages marneux entre les bancs calcaires.

C – Carrières de Taicha (Djelfa) : Il s'agit d'un massif représenté par de bancs d'épaisseur métriques, de nature calcaire grisâtre parfois jaunâtre, généralement peu altéré,

D – Carrières de Zeccar (Djelfa) : Le gisement objet de cette étude est une formation marine constituée par des calcaires blanchâtres à grisâtres durs en profondeur et friable en surface.

E – Carrières d'Oued Sdeur (Djelfa) : Il s'agit d'un même massif représenté une formation marine constituée par des calcaires blanchâtres à grisâtres durs en profondeur et friable en surface.

F – Carrière de Ksar Chellala (Cosider C49): La GNT (0/31.5) provenant des deux stations mobiles est conforme aux fiches N° 01 et 02 des spécifications techniques STB 590 indice B.

Les résultats des essais au laboratoire réalisés sur les matériaux prélevés de ces carrières sont consignés ci-après :

Provenance	Coefficient d'aplatissement	Los Angeles	Micro Deval Humide
Boughezoul	2.65	27.52	24
	17.58	43.6	52.8
Berrouagia	21.91	23.3	60.52
	32.3	60.52	64.6
	12.21	57.2	69
	21.48	64.46	78
	11.08	21.72	25

	11.37	22.82	22
	15.29	29.22	24
Zeccar	17.19	30.39	14.18
	11.31	31.76	14.98
	7.4	27.22	17.5
Taicha	14.68	20.54	12.2
	14.12	21.64	15.2
	11.14	20.18	17.2
Oued Sdeur	10.6	28.76	18.8
	9.22	30.92	23
	10.06	30.12	27.2
	18.81	28.43	26.24
	24.7	27.2	24.2
	26	25.98	25.98

Tableau VI-6 : Résultats d'essais au laboratoire sur les matériaux des carrières

Concernant les carrières, deux qui se trouvent proches au tracé ont été visitées, dans lesquelles s'extraient et traitent des calcarénites et des conglomérats. Cependant, les entreprises exploitantes se sont niées à faciliter n'importe quel type d'information. Ces carrières sont les suivantes:

Carrières	Origine de l'information	Coordonnée X	Coordonnée Y	Distance au tracé (Km)	Situation actuelle
C-1	Propre	480725	3957054	2,750	Active
C-2	Propre	491304	3938378	31	Active

Tableau VI-7 : Coordonnées et situation des carrières proche du tracé

Il est proposé l'utilisation de ces matériels comme couche de forme, béton, sous-ballast et ballast.

- Gîte d'emprunt 01 KEF LESFER : (à 24 Km du PK 23+200)

Selon la norme **NFP 11 300** le sol est de classe **C1B51s**, l'utilisation de ce matériau en remblai demande l'humidification pour transformer de l'état sec à l'état humide

Selon la fiche **UIC 719R**, le sol comportant des roches dures avec de coefficient de LOS-Angels est de $22\% < 30\%$ et Micro-deval de valeur de $18\% < 25\%$, ce sol est de qualité **QS3**.

VI.4. Vérification de stabilité des talus vis-à-vis le glissement :

Pour la vérification de stabilité des talus en déblai et en remblai on utilise le logiciel **GEO 5** et on choisit la méthode de Bishop pour les ruptures circulaires.

Les principaux paramètres géotechniques utilisés dans les analyses de stabilité des talus incluent :

- Le poids spécifique γ .
- La cohésion C .
- L'angle de frottement interne ϕ .
- La présence d'eau souterraine.

Pour les analyses de stabilités, les facteurs de sécurité à prendre en compte sont les suivants :

- $FS > 1.5$ à long terme.
- $FS > 1.3$ à court terme.
- $FS > 1.1$ en situation sismique.

VI.4.1. Cas de déblai :

Le calcul de stabilité des talus dans le cas de déblai est effectué sur un déblai d'une hauteur maximale d'environ 28 m au PK 14+225.

Dans ce cas les caractéristiques du sol sont les suivantes :

- Le poids spécifique γ : 20.1 KN/m³
- La cohésion : $C = 61$ Kpa
- L'angle de frottement interne : $\phi = 15^\circ$

Ces caractéristiques sont tirées à partir des résultats des essais au laboratoire sur un sondage qui présente les mêmes formations géotechniques et géologique.

Les résultats de calcul de stabilités à long terme et en situation sismique indiquent que la stabilité est vérifiée avec une pente de 3H/2V.

VI.4.2. Cas de remblai :

Pour analyser la stabilité des talus en remblai, on applique le même principe, un remblai de 12.95 m au PK 0+250 est analysé avec les caractéristiques suivantes :

- Le poids spécifique γ : 18 KN/m³
- La cohésion : C = 20 Kpa
- L'angle de frottement interne : $\varphi = 21^\circ$

Le sol support Qal-2 (Alluvion récentes) avec ces caractéristiques :

- Le poids spécifique γ : 18 KN/m³
- La cohésion : C = 29 Kpa
- L'angle de frottement interne : $\varphi = 16^\circ$

Un autre remblai au PK 15+000 avec une hauteur maximale de 14.34 m est analysé avec les caractéristiques suivantes du sol support présent du sondage SC 11 :

- Le poids spécifique $\gamma = 18.9$ KN/m³
- La cohésion : C = 37 Kpa
- L'angle de frottement interne : $\varphi = 22.93^\circ$

Tableau VI-8 : Résultats d'analyse de stabilité des talus les plus critiques

Situation	FS (demandé)	FS (calculé)		
		Déblai PK 14+225	Remblai PK 0+250	Remblai PK 15+000
Long terme	1.5	1.51	1.86	1.73
Sismique	1.1	1.30	1.56	1.46

VI.5. Conclusion :

L'étude géologique et géotechnique a permis d'analyser de manière détaillée le contexte environnemental et géologique du projet. Grâce aux essais réalisés in situ et en laboratoire, les propriétés des sols ont été précisément identifiées, permettant également d'évaluer les principaux risques géotechniques.

L'ensemble de ces résultats a constitué une base essentielle pour orienter la conception de solutions adaptées, assurant ainsi la stabilité, la sécurité et la pérennité de l'infrastructure.

Chapitre VII : Assise ferroviaire

VII. Assise ferroviaire :

VII.1. Introduction :

Introduction :

Pour assurer la durabilité de notre projet sur le long terme, il est essentiel d'étudier le sol support afin d'obtenir une structure stable. Comprendre le comportement de la structure d'assise ferroviaire est devenue nécessaire en raison des contraintes imposées par les charges importantes des trains et des variations du terrain sur lequel le chemin de fer est construit. Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les principes fondamentaux et les aspects essentiels relatifs à la conception dimensionnelle du corps d'assise ferroviaire. Notre attention sera particulièrement portée sur les facteurs clés qui façonnent sa conception. Nous débuterons en explorant les rôles et les matériaux du corps d'assise ferroviaire, puis les méthodes de dimensionnement pour assurer sa robustesse et sa stabilité. Nous soulignerons également l'importance des normes internationales pour garantir une infrastructure ferroviaire durable.

VII.2. Différentes couches d'assises :

VII.2.1. Le ballast :

Le ballast ferroviaire est constitué de pierres concassées ou de graviers anguleux, caractérisés par un fort angle de frottement interne et une cohésion nulle, assurant ainsi une bonne résistance aux charges des trains.

Il doit respecter les normes **SNTF** et **NF P53-695**, notamment :

Granulométrie : 25/50 mm (selon **CEN/TC/154**)

Los Angeles $\leq 19 \%$

Micro-Deval $\leq 6 \%$

Résistance à la compression $\geq 1200 \text{ kg/cm}^2$

La forme anguleuse et la rugosité des granulats garantissent une bonne stabilité et cohésion du ballast sous les traverses.

➤ Rôles du ballast :

Le ballast joue plusieurs rôles essentiels dans la voie ferrée :

- Il assure le drainage et supporte efficacement les traverses.
- Il répartit les charges des trains de manière uniforme, protégeant la structure sous-jacente.
- Il absorbe les vibrations grâce au frottement entre ses éléments.
- Il limite la croissance de la végétation sous la voie.

Ces fonctions garantissent la sécurité et la durabilité de l'infrastructure ferroviaire.

VII.2.2. Sous couche :

Il s'agit d'une couche intermédiaire située entre le ballast et la plateforme, qui peut être simple ou composée de plusieurs couches. Elle a pour rôle de soutenir le ballast et se compose

généralement d'une couche de gravier bien gradué (0/31,5 mm), éventuellement complétée par une fondation pour les sols moins favorables et, si nécessaire, par une couche anti-contaminante avec géotextile pour assurer la séparation.

➤ Rôles de la sous couche :

Les rôles de la sous-couche ferroviaire sont :

- Préserver l'intégrité de la plateforme en limitant les effets des mouvements du sol et de l'eau.
- Assurer un bon drainage pour éviter l'humidité qui pourrait déstabiliser la voie.
- Renforcer la capacité portante en répartissant efficacement les charges des trains.
- Protéger contre l'érosion et les dommages liés aux tassements ou gonflements du sol.
- Servir de barrière empêchant la contamination du ballast par les matériaux de la plateforme, assurant ainsi la durabilité de la voie.

VII.2.3. La plate-forme :

La plate-forme ferroviaire est la base sur laquelle repose la voie composée de plusieurs couches de matériaux. Elle est formée de terres rapportées pour un remblai ou du sol naturel pour un déblai.

➤ Rôles de la plate-forme :

La plateforme ferroviaire joue un rôle fondamental dans la stabilité et la durabilité de la voie. Elle assure notamment :

- Le drainage des eaux pluviales et des eaux de surface vers les systèmes d'assainissement.
- L'absorption des vibrations générées par le passage des trains.
- Le rabattement du niveau des eaux souterraines si nécessaire.
- La prévention de la remontée des fines (limons et argiles) du sol vers le ballast.

VII.3. Classification des sols pour la plate-forme :

La qualité du sol support dépend de sa nature géotechnique (granularité, résistance) et des conditions hydrogéologiques (nappe, drainage). La couche superficielle ne doit pas être affectée par l'eau ou des percolations nuisibles.

Dans le cadre du présent projet, la classification est établie selon les référentiels **GTR** et **UIC 719R**. Les sols rencontrés sont majoritairement de classe **QS1**. Les zones en **QS0** ont été traitées par substitution, permettant d'obtenir une classe homogène **QS1** sur l'ensemble du tracé.

VII.4. Qualité et classe de Plate-forme :

Compte tenu de ce qui précède, notamment de la classe des qualités du sol support le plus souvent rencontré le long du tracé est en majorité QS1, Ainsi que les prescriptions données par les UIC nous conseillons d'opter pour une plateforme de type P3 (plateforme bonne) dimensionnée préalablement pour

Un tel type de sol (QS1). Sachant que la portance d'une plate-forme dépend :

- de la qualité du sol constituant le corps de remblai ou du sol en place en fond de déblai
- de la qualité et de l'épaisseur de la couche de forme (lorsque cette dernière existe).

On peut distinguer, en fonction des paramètres ci-dessus, les trois classes de portance de plates-formes suivantes :

✓ P1 : plate-forme médiocre,

✓ P2 : plate-forme moyenne,

✓ P3 : plate-forme bonne.

VII.5. Méthode de dimensionnement adoptée :

Le dimensionnement de la couche d'assise et l'épaisseurs de la couche de forme a été effectué en suivant les indications de la fiche UIC 719R. La définition de la classe de la plateforme suppose la classification préalable aussi bien de la qualité du sol support que de celle des matériaux constituant la couche de forme elle-même (voir le tableau au-dessous). Dans ce contexte et pour homogénéiser la structure d'assise, nous considérons que le sol support est de type QS1 tout le long du tracé, Et la classe de portance envisagée pour la plate-forme est de P3 (plateforme bonne) La qualité de la couche de forme à mettre en œuvre pour obtenir cette classe de portance est de QS3

Tableau VII-1 : Détermination de la classe de portance de la plate-forme

Qualité du sol support	Classe de la plate-forme	Couche de forme à mettre en œuvre pour obtenir cette classe	
		Qualité	Épaisseur min (m)
QS1	P1	QS1	-
	P2	QS2	0,50
	P2	QS3	0,35
	P3	QS3	0,50
QS2	P2	QS2	-
	P3	QS3	0,35
QS3	P3	QS3	-

Le résultat obtenu de ce tableau au-dessus, c'est une couche de forme d'épaisseur e est égal à 50 cm minimum de qualité QS3.

VII.6. Calcul d'épaisseur minimal d'après la fiche UIC 719 R :

Une plateforme ferroviaire est constituée généralement par un ensemble de sous couches à savoir : Une couche de ballast, Une sous-couche qui comprend les couches de sous ballast, couche de fondation, couche anti-contaminant et géotextile. L'épaisseur de l'ensemble ballast + sous-couche, conformément à la fiche UIC 719 est donnée par l'expression suivante :

$$e = E + a + b + c + d + f + g \dots\dots\dots \text{En mètre}$$

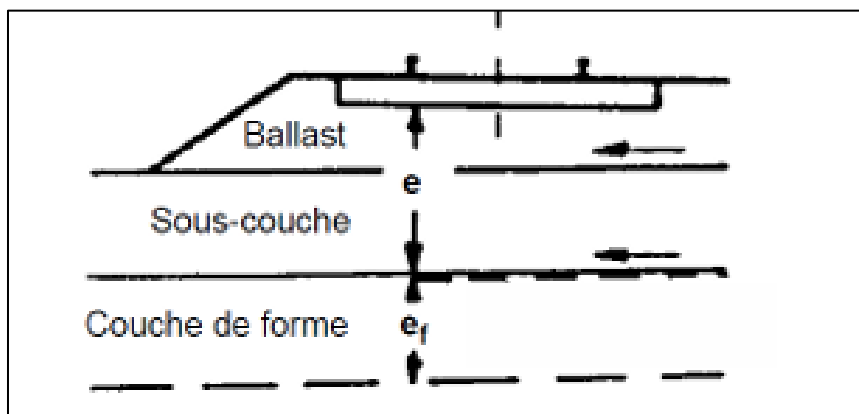


Figure VII-1 Calcul de l'épaisseur minimale "e" des couches d'assise

- **E** = Classe de la plateforme (P1, P2, P3)
- **a** = Classe de la voie (groupe de 1 à 6 selon UIC 714)
- **b** = Type et longueur de la traverse
- **c** = Type de dimensionnement
- **d** = Charge maximale à l'axe
- **f** = Vitesse et type de portance de la plateforme
- **g** = Géotextile

D'où :

- **E** = 0,45 m pour une plateforme de classe de portance P3
- **a** = 0,00 m pour les groupes UIC 1 et 2 (ou lignes à $V > 160$ km/h, quel que soit le groupe UIC)
- **b** = $(2,5-L)/2 = 0,043$ m pour les traverses en béton de longueur $L = 2,415$ m (traverse Monobloc)
- **c** = 0,00 m pour un dimensionnement normal
- **d** = 0,05 m (pour la charge nominale d'essieu de 22,5 t/essieu)
- **f** = 0,00 m pour toutes les lignes parcourues à $V \leq 160$ km/h et pour les plateformes de portance P3
- **g** = 0,00 m, pas de géotextile lorsque la couche de forme est en sol QS3

L'épaisseur des couches d'assise (e) est :

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

$$e = 0,45 + 0 + 0,043 + 0 + 0,05 + 0 + 0 = 0,543 \approx 55 \text{ cm.}$$

On prend l'épaisseur de la couche de ballast de 30 cm sous la traverse basse, ça donne une couche de sous-ballaste de 25 cm (voir le tableau au-dessous)

Tableau VII-2 : Épaisseurs des composants de la structure d'assise.

Couche	Epaisseur (cm)
Ballast	30
Sous-ballast	25
Couche de forme de type QS3	50

Remarques :

Les structures d'assise types sont déterminées pour diverses classes de portance obtenues par les combinaisons possibles des qualités du sol support et des caractéristiques de la couche de forme.

D'après la fiche UIC 719 R, une couche de fondation en grave anti contaminante bien graduée, permettant la circulation des engins de chantier, n'est pas nécessaire pour une plateforme de classe de qualité QS3. Dans le présent projet, la couche de forme mise en œuvre permet d'atteindre cette classe de qualité.

VII.7. Conclusion :

Ce chapitre a montré l'importance d'un dimensionnement correct des couches d'assise pour assurer la durabilité et la performance des voies ferrées. Nous avons étudié les types de couches et les méthodes pour répartir les charges et résister aux contraintes.

Chaque projet nécessite une adaptation aux conditions locales, en s'appuyant sur les normes et l'expertise. La recherche continue reste essentielle pour maintenir la qualité et l'efficacité du transport ferroviaire.

Chapitre VIII : Profil en travers

VIII. Profil en travers :

VIII.1. Introduction :

Le profil en travers constitue une représentation graphique précise de la coupe transversale de la voie projetée, réalisée perpendiculairement à son axe. Il met en évidence les variations du terrain naturel, les dimensions de la voie, les dévers de la plate-forme ainsi que les caractéristiques des différentes couches qui la composent.

Son importance réside dans son rôle clé pour une gestion efficace des projets ferroviaires, il permet d'estimer avec précision les volumes de terrassement, de garantir la sécurité de l'infrastructure en identifiant les risques potentiels, et de contribuer ainsi à la durabilité et au respect des exigences environnementales.

VIII.2. Les éléments du profil en travers :

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

VIII.2.1. Les éléments de superstructure

- Le type de rail utilisé.
- La valeur de l'écartement de la voie.
- La distance entre les axes.
- System d'Attaches.
- La valeur de devers en courbe (maximum).

→ Pour notre projet, nous avons une voie double avec un entre-axe de 4.2 m.

VIII.2.2. Les éléments de l'infrastructure :

- Ballast et les épaisseurs et la nomination de chaque couche.
- Plateforme ferroviaire : La surface sur laquelle repose la voie ferrée.
- Les pentes transversales de chaque couche.
- La pente latérale de la plate-forme.

VIII.2.3. Les éléments du talus :

- La pente déblai et remblais.

VIII.2.4. Les éléments d'assainissement

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

VIII.3. Profile en travers type du projet :

Le profil en travers type de ce projet correspond à une **voie double**, avec une **forme symétrique** et une **largeur de plateforme de 13,6 m**, que ce soit en déblais ou en remblai.

La voie ferrée est constituée de **rails type 60E1** ($h = 0,172$ m) avec **attaches élastiques de type NABLA** espacées de 1435 mm sur les voies de services dans la gare et de type **VOSSLOH** dans le reste du tracé, reposant sur des traverses **bibloc en béton** en gare dans les voies de service, des travers en bois dans les appareils de voies et des **traverses monobloc**

M450NP ($h = 0,220$ m) dans le reste du tracé, elles-mêmes installées sur un **ballast de 0,30 m d'épaisseur**, avec une **pente latérale de 3H/2V**.

Les épaisseurs des couches de **sous-ballast** et de **couche de forme** sont spécifiées dans le chapitre relatif à l'**assise ferroviaire**.

Dans les zones de **remblai et de déblais**, les talus ont été définis avec une **inclinaison de 2H/1V pour les talus en remblai** et **3H/2V pour les talus en déblais**.

Des **fossés longitudinaux** de dimensions **$h = 0,9$ m ; $b = 0,8$ m**, avec une **pente de 3/2**, ont été prévus pour le drainage.

VIII.4. Calcul des cubatures :

Les volumes de terrassement représentent les variations de volume des déblais et des remblais dans le projet, visant à créer une surface uniforme en alignement avec la trajectoire du projet.

Les volumes de terrassement sont calculés en se basant sur plusieurs critères importants :

- Les profils en long.
- Les profils en travers.
- Les distances entre les profils.

Dans notre projet, les volumes de terrassement ont été calculés à l'aide du logiciel Covadis 17.

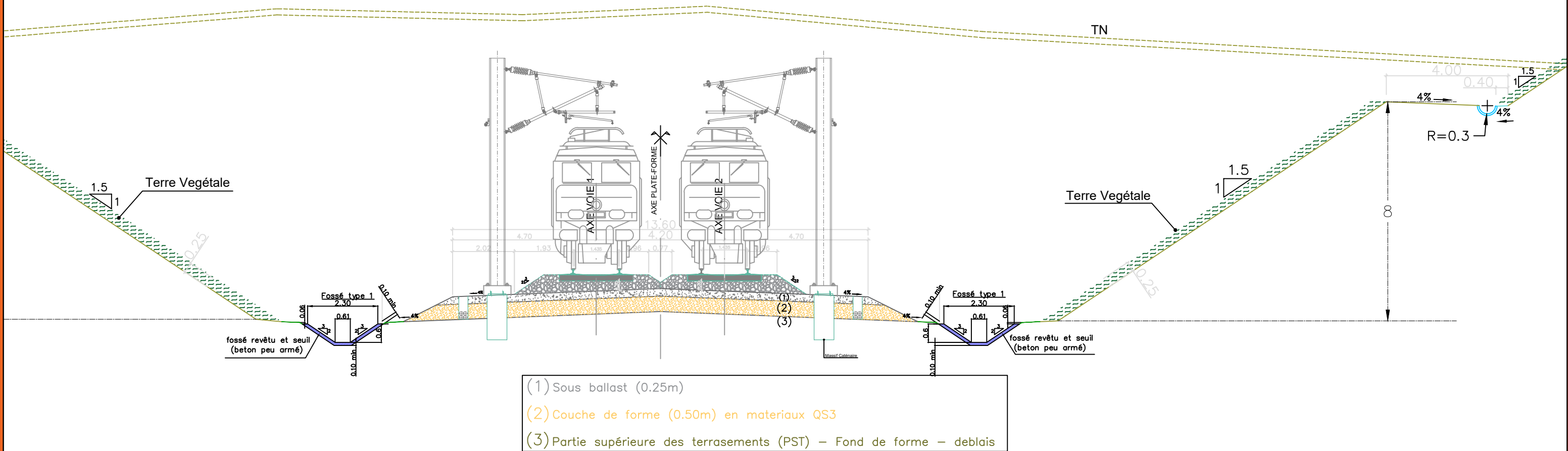
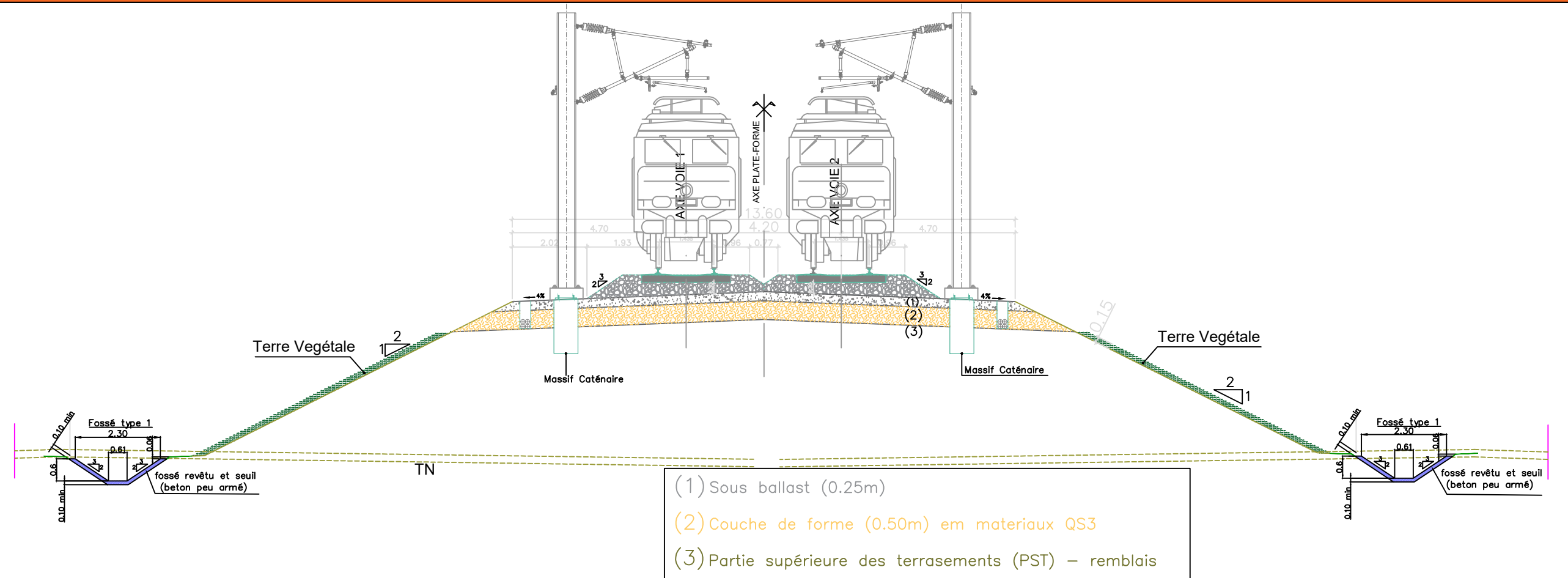
- Les détails de calcul résumés dans le tableau suivant :

Tableau VIII-1 : Les volumes des différentes couches

Nature	Remblai	Déblai	Décapage de la terre végétale	Ballast	Sous ballast	Couche de forme
Volume (m³)	1 133 913,7	1 201 651,7	102 187,0	69 046,2	35 135,2	75 544,6

VIII.5. Conclusion :

Les profils en travers jouent un rôle fondamental dans la fiabilité de la conception et de la réalisation des projets d'infrastructure. Ils permettent d'assurer un équilibre entre les exigences de sécurité, l'optimisation des coûts et la pérennité des ouvrages.



Chapitre IX : Terrassement et ouvrages

IX. Terrassement et ouvrages :

IX.1. Introduction :

Dans les projets ferroviaires, les terrassements sont essentiels pour préparer le terrain à la pose des voies. Les terrassements concernent les travaux de mise en forme du terrain tels que le déblai et le remblai qui consistent à creuser et à remblayer les tranchées afin de créer une assise solide pour les rails.

IX.2. Les terrassements :

Les terrassements jouent un rôle primordial dans la construction des infrastructures ferroviaires. Ils impliquent plusieurs opérations visant à modeler le terrain pour créer une plateforme stable pour la voie ferrée. Ces opérations comprennent notamment :

- Décapage de la couche de terre végétale pour atteindre le substrat sous-jacent.
- Réalisation de déblais et de remblais pour ajuster les niveaux de terrain conformément aux exigences d'élévation.
- Mise en place méthodique des différentes couches structurelles telles que la sous-couche et la couche de ballast afin de créer une assise robuste et stable pour la voie ferrée.

La précision de ces opérations est fondamentale pour garantir la fiabilité et la résilience des infrastructures ferroviaires. En conséquence, des études géotechniques approfondies sont indispensables pour évaluer de manière exhaustive les caractéristiques du sol et pour choisir judicieusement les méthodes de terrassement les mieux adaptées.

IX.3. Objectifs et enjeux des terrassements :

Il est essentiel de comprendre pleinement l'importance indéniable des terrassements dès le début de la préparation du terrain pour la construction. Ils assurent :

- La création d'une surface stable et uniforme pour assurer un passage fluide des trains.
- L'utilisation de matériaux de qualité adaptés (granulométrie, compacité, etc.)
- La protection des zones sensibles (zones humides, habitats naturels, etc.)
- Le modelage des pentes des talus des déblais et des remblais pour prévenir les risques de glissements de terrain.
- La gestion efficace du drainage pour éviter l'érosion et les problèmes d'accumulation d'eau.
- La réduction des nuisances sonores et vibratoires.
- Le respect des normes environnementales pour minimiser l'impact sur les écosystèmes locaux.
- La sécurité des travailleurs pendant les opérations de terrassement.
- La préservation des ressources naturelles telles que l'eau et les sols fertiles.

IX.4. Pente des talus en déblai et en remblai :

Lors de la conception des ouvrages en terre, une attention particulière est portée à la stabilité des pentes de talus tant pour les déblais que pour les remblais.

Les pentes de talus couramment employées conformément au chapitre 7.2.2 « Ouvrage en terre » du référentiel technique de la SNTF et exprimées en fraction base sur hauteur.

- Cas déblais : 1/2. 2/3. 1/1. 3/2. 2/1. 2.5/1. 3/1.

- Cas remblai : 3/2. 2/1. 2/3.

Elles doivent être établies de façon à assurer la stabilité globale de l'ouvrage en tenant compte des éléments suivants :

- Les propriétés géotechniques des terrains traversés en déblai ou du sol de support et des matériaux employés pour les remblais.
- La hauteur de l'ouvrage.
- La configuration topographique du site et les risques naturels.

Remarque : Pour notre projet on admet d'utiliser une pente de 3H/2V pour le déblai et une pente de 2H/1V pour le remblai et cela après une étude de stabilisation des talus au glissement effectuée dans le chapitre « Étude géologique et géotechnique »

IX.5. Les bermes :

Les bermes stratégiquement positionnées le long des talus ferroviaires jouent un rôle important dans la préservation de la stabilité structurelle et du drainage efficace des voies. Leur intégration soignée permet de maîtriser les pentes et de prévenir tout risque d'érosion assurant ainsi le bon fonctionnement et la durabilité des infrastructures ferroviaires dans différentes situations.

- Largeur optimale : Les bermes doivent avoir une largeur adaptée, généralement entre 1 et 4 mètres pour permettre l'accès aux équipements de maintenance tout en garantissant une stabilité suffisante du talus.
- Pente idéale : Une pente bien ajustée typiquement entre 2 et 4% assure un drainage efficace sans risque d'accumulation d'eau préservant ainsi la durabilité des bermes.

Remarque : Pour notre cas une berme de largeur de 4m et une pente de 4% est utilisée pour la construction des talus du projet.

IX.6. Protection des talus :

En raison des caractéristiques intrinsèques des sols en place, il est prévu que les talus en déblais soient revêtus d'une couche minimale de 0.20 mètre de "terre végétale" assortie d'espèces végétales appropriées dès l'ouverture des excavations. Cette mesure a pour objectif de prévenir l'effet érosif potentiel du ruissellement superficiel.

IX.7. Le compactage :

Le compactage est une opération essentielle des travaux de terrassement ferroviaire, conditionnant la portance et la stabilité de la plateforme.

Il dépend principalement de la nature du sol, de sa teneur en eau et des engins utilisés, qui influencent directement la qualité de densification.

Les matériaux sont mis en œuvre en couches élémentaires d'épaisseur adaptée afin d'assurer un compactage homogène. La teneur en eau peut être ajustée par arrosage ou essorage pour atteindre l'optimum de compactage.

Le contrôle de qualité est réalisé conformément aux recommandations du guide SETRA-LCPC afin de garantir la durabilité de la plateforme.

IX.8. Réutilisation des matériaux excavés :

Dans le tronçon d'étude du PK 13+200 au PK 14+325, on a un déblai en terrain meuble mise en remblai, les autres zones de déblai seront mises en dépôt. Bien que d'une façon très expressive, mais même ainsi avec quelque expression, on prévoit d'obtenir dans les zones d'excavation distribuées au long du tracé des matériaux rocheux proches au type QS3. Entre le PK 13+200 et le PK 14+325, sensiblement, ont lieu des formations de l'Eocène composées par des marnes grisâtres et lumachelles (Ei-1) et des calcaires gréseux avec Nummulites (Ei-2) avec comportement rocheux compétent (W2-3), bien que présentant un indice de fracturation élevé (F4-5).

Il est prévu d'une façon générale que les autres matériaux qui seront excavés et présentent des caractéristiques minimales qui permettent leur réutilisation dans la construction des remblais. C'est le cas des sols QS1(a) qui présentent plasticité de baisse à moyenne, pas expansifs, avec limite de liquidité (LL) inférieure à 50% et IP (indice de plasticité) inférieur à 20%, et des matériaux classifiés comme QS1(b), correspondants aux sols avec des pourcentages de fins entre 15% à 40%. Ces matériaux seront pour la plupart de ce qui sera excavé dans les formations alluvions récentes et un pourcentage significatif de l'excaver dans les formations du Crétacé supérieur-Paléocène inférieur (Cs-P) et du Miocène (Mi-1 à 3), correspondantes à des mélanges de sols et roche et matériaux rocheux évolutifs et peu durs.

IX.9. Méthode d'excavation :

- **Excavation mécanique (MEC)** : Correspondante aux situations d'excavation en sols ou roches souples très modifiées et/ou très fracturées, exécutables avec des équipements mécaniques conventionnels du type pelles d'excavation, pelleteuses ou machines giratoires de petite puissance (excavable).
- **Excavation avec machinerie lourde / Rippers (RIP)** : Correspond aux situations de démontage en roches de résistance de baisse à moyenne peu fracturées ou de résistance moyenne à élever mais très fracturées et/ou en couches de petite épaisseur, exécutables seulement avec machinerie lourde (avec puissance élevée), équipée de ripper et marteau de démolition ou d'un tracteur lourd de tracé équipé avec ripper vibratoire.
- **Excavation avec explosifs (EXP)** : Correspond aux situations de démontage en roches de résistance de moyenne à haute moyennement à peu fracturées et/ou en couche de grande épaisseur, pas ripables, qui exigent l'utilisation d'explosifs.

IX.10. Les ouvrages et leurs choix :

Vu la présence de plusieurs contraintes dans le tracé tels que des routes et piste, des habitations, des oueds (voir chapitre IV et V), plusieurs ouvrages sont conçus éviter ces croisements, les ouvrages d'art sont présentés et récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau IX-1 : Récapitulatif des ouvrages d'art

N°	PK	Type de passage	Type d'ouvrage	Longueur (m)	Structure porteuse	Gabarit routier minimal (m)
1	2+375	Inférieure	Viaduc 1	236	Poutre en BP	5.05
2	2+768	Inférieure	Viaduc 2	754	Poutre en BP	-
3	3+982	Inférieure	Viaduc 3	1840	Poutre en PRS	5.00
4	6+112	Inférieure	Viaduc 4	225	Poutre en BP	-
-	6+737	Inférieure	Pont cadre	17	Dalle en BA	5.05
5	7+362	Inférieure	Viaduc 5	200	Poutre en BP	-
6	8+155	Inférieure	Viaduc 6	175	Poutre en BP	-
7	8+937	Inférieure	Viaduc 7	130	Poutre en BP	5.05
8	10+225	Inférieure	Viaduc 8	278	Poutre en BP	11.85
9	10+605	Inférieure	Viaduc 9	95	Poutre en BP	-
10	11+205	Inférieure	Viaduc 10	566.6	Poutre en BP	-
11	12+100	Inférieure	Viaduc 11	305	Poutre en BP	-

Remarque :

Pour les ouvrages ferroviaires de grande longueur, une étude de l'interaction entre le rail et le tablier est nécessaire afin de vérifier les effets des déplacements longitudinaux.

Selon la longueur de l'ouvrage et son comportement structurel, des dispositifs spécifiques tels que des appareils de dilatation du rail ou des zones de respiration peuvent être prévus pour garantir la sécurité et la stabilité de la voie.

IX.11. Modélisation des ouvrages d'art en 3D par le BIM :

En utilisant les logiciels d'Autodesk tel que CIVIL 3D et INFRAWORK, et pour mieux simuler le future tracé, une modélisation est faite pour tous le tracé, les figures suivantes montrent les viaducs modélisés :



Figure IX-1 : Viaduc 1 traversant l'autoroute nord sud A1

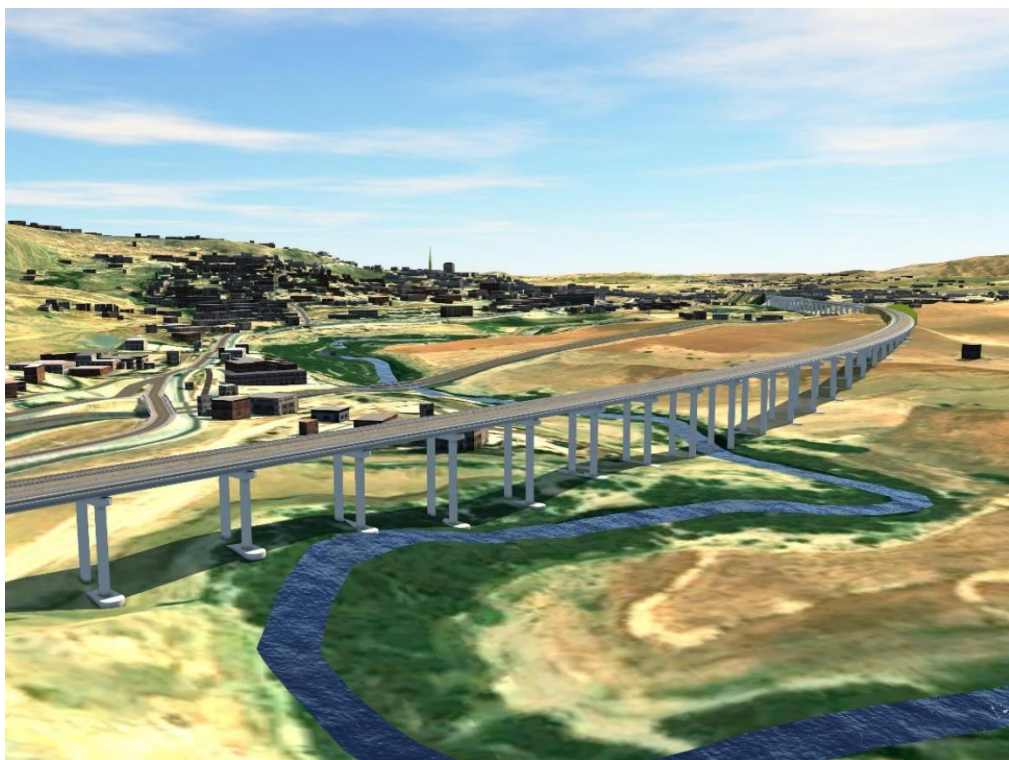


Figure IX-2 : Viaduc 2 traversant oued Chéloff



Figure IX-3 : Viaduc 3 traversant la ville de Ksar El Boukhari

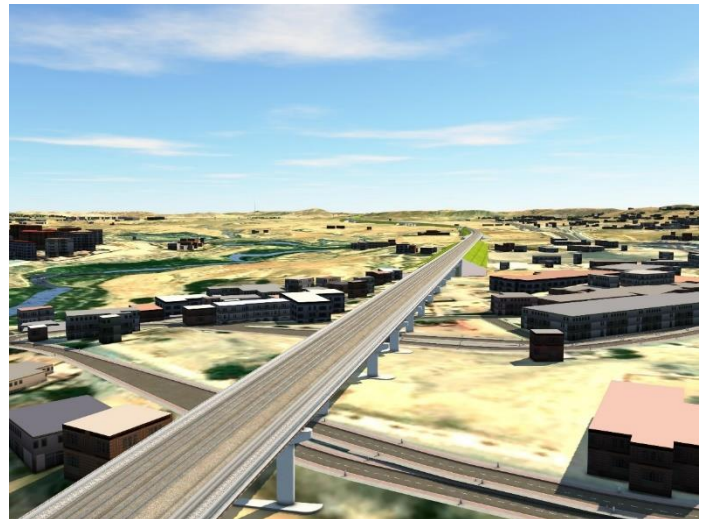


Figure IX-4 : Viaduc 3 en PRS



Figure IX-5 : Rétablissement routier (pont cadre)

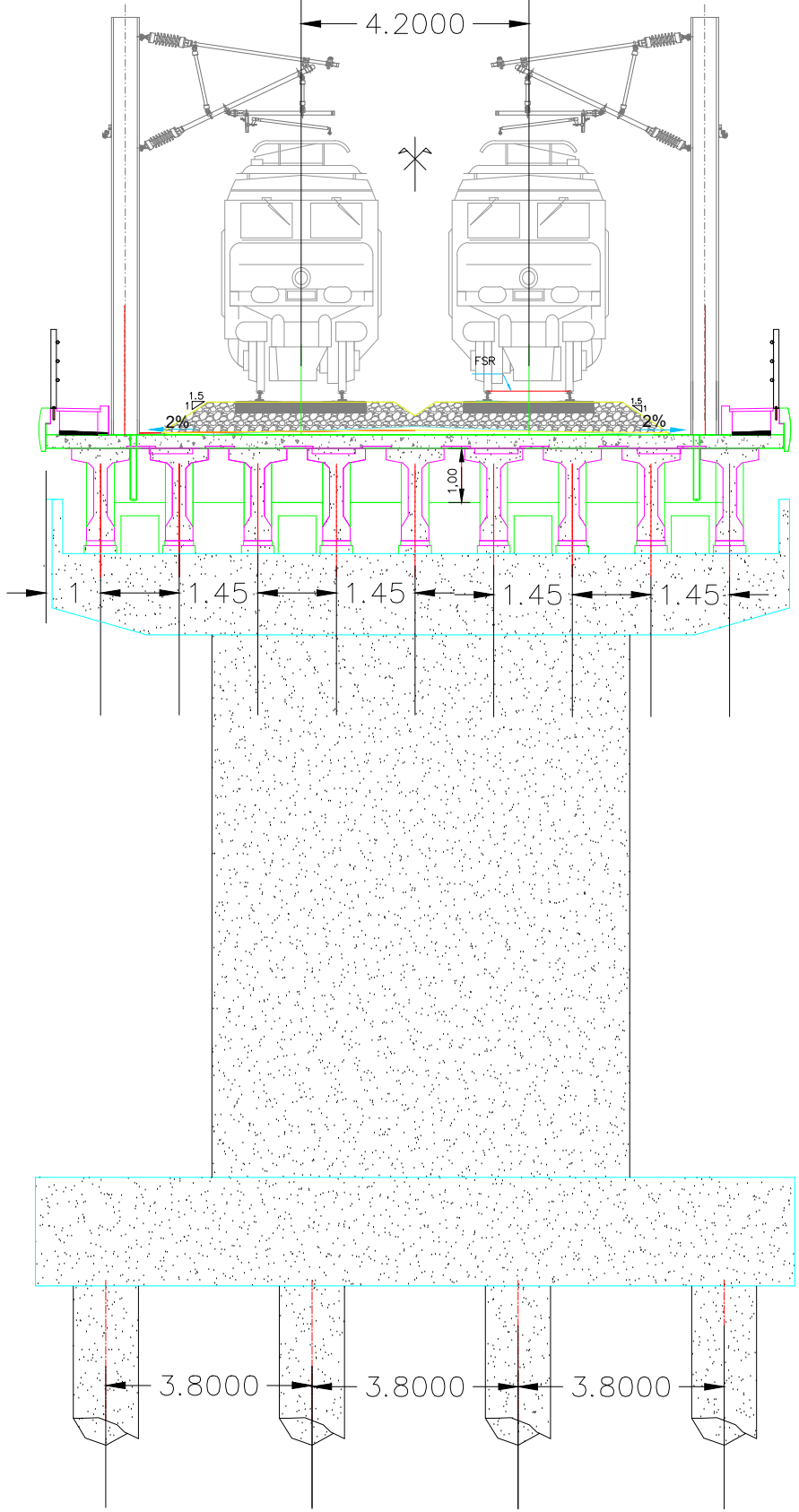


Figure IX-6 : Viaduc 7 traversant l'autoroute A1

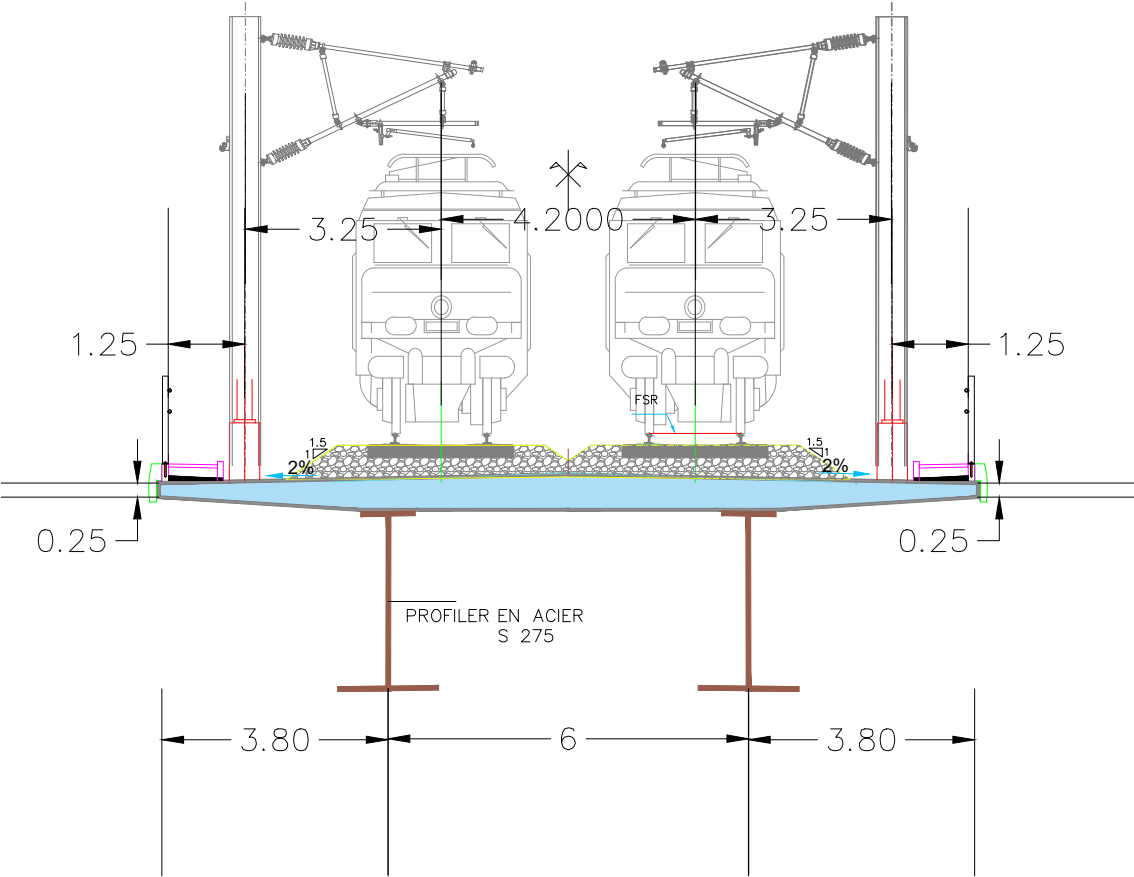
IX.12. Conclusion :

En conclusion, les travaux de terrassement et la construction des ouvrages d'art jouent un rôle fondamental dans la réussite de projet. Leur bonne réalisation exige la précision, organisation et le respect des normes techniques.

Coupe transversale sur pile
Pont à poutres en BP



Coupe transversale à mi-travée
Pont en acier



Chapitre X : Conception de la gare

X. Conception de la gare :

X.1. Introduction :

Depuis longtemps, les gares ont beaucoup changé avec le développement des moyens de transport. La gare ne sert plus seulement au transport ferroviaire. Elle participe également au développement urbain, à l'organisation des déplacements, à l'aménagement du territoire et à l'amélioration du cycle de vie. Sa conception doit prendre en compte plusieurs aspects, comme la sécurité, le confort des usagers, la circulation des personnes et des marchandises, ainsi que le respect de l'environnement.

Grace à des équipements adaptés et à une bonne organisation, la gare permet d'assurer un service efficace et sécurisé.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les bases principales de la conception d'une gare afin de les appliquer à notre projet de façon pratique, sûre et adaptée aux besoins.

X.2. Différents types de gares :

On distingue les types de gares selon les critères principaux :

- L'usage commercial (gare de voyageurs, de marchandises ou mixte).
- La fonction technique au sein du réseau (gare de passage, terminus, gares techniques de croisement et de dépassement permettant la gestion des flux sur voie unique ou saturée).

X.3. Le plan de masse d'une gare :

Le concepteur d'une gare doit réaliser un plan de masse complet en intégrant l'ensemble des installations nécessaires, tout en s'appuyant sur trois paramètres techniques essentiels :

- **Les catégories de voies** : Elles permettent de définir le rôle de chaque voie au sein de la gare ainsi que les équipements correspondants.
- **Le trafic ferroviaire** : L'étude du volume, de la fréquence et de la nature des circulations est indispensable pour déterminer l'importance de la gare et dimensionner correctement ses infrastructures.
- **La situation géographique** : L'emplacement de la gare joue un rôle déterminant dans le choix des installations, car il influence le type de trafic attendu et les besoins en voies.

L'analyse rigoureuse de ces trois aspects est indispensable pour concevoir un plan de masse cohérent, fonctionnel et capable d'assurer une exploitation ferroviaire efficace.

X.4. Conditions et hypothèses de conception de la gare de voyageurs :

- Conditions :

La conception d'une gare de voyageurs, destinée à accueillir les trafics voyageurs mais aussi le passage des trains de marchandises, repose sur plusieurs éléments essentiels :

- Prise en compte des conditions du site (géologie, topographie, accès, urbanisation future).
- Organisation adaptée des voies voyageurs.
- Séparation et fluidité des flux pour une exploitation efficace.
- Dimensionnement selon le trafic prévu.
- Implantation stratégique pour répondre aux besoins de transport et de logistique.
- Bonne intégration dans l'environnement territorial et économique.

- Hypothèses :

On a une ligne à double voie avec une vitesse de 220 Km/h pour les trains de voyageurs donc deux voies latérales de stationnement de trains de voyageurs sont nécessaires avec deux quais intérieurs (central) et extérieur pour assurer la fluidité des voies principales qui seront rapide sans marquer d'arrêt, par contre les trains de marchandise ont une vitesse de 100 Km/h sans marquer l'arrêt, ainsi un aménagement des voies est essentiel pour garantir la fluidité du trafic, alors on suppose :

- Le train de voyageurs à une longueur d'environ 225 m pour 3 wagons de 75 m, ou bien 300 m pour 4 wagons de 75 m.
- La longueur des quais voyageurs est de 350 m avec largeur de 6m pour celui d'extrémité et 8m pour celui centrale.
- La longueur de train marchandise est d'environ 342 m pour 19 wagon de 18m.

X.5. Détails sur la gare de voyageurs de Ksar El Boukhari :

- La gare est conçue pour un trafic voyageur et marchandises.
- Le premier coté est constitué de deux voies principales et deux voies de services, avec deux quais A et B.
- Un bâtiment voyageur est conçu coté quai A avec parking qui contient un accès vers l'autoroute A1.
- Pour les trains marchandises une possibilité d'extension future liée à la croissance économique de la région et l'économie de transport.

X.6. Caractéristiques de la gare :

X.6.1. Déclivité :

A 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.

X.6.2. Appareil de voie :

L'exploitation ferroviaire repose sur des équipements spécifiques permettant de connecter, orienter et diversifier les parcours des trains : les appareils de voie (ADV).

Un appareil de voie est un ensemble technique assurant le guidage des convois d'une voie vers une autre, tout en maintenant la continuité et la sécurité de circulation sur le réseau.

En règle générale, il comprend trois composantes fondamentales :

- ✓ L'aiguillage.
- ✓ La zone intermédiaire.
- ✓ La partie centrale, appelée croisement.

X.6.3. Garage franc :

Le garage franc représente une longueur de voie réservée permettant à un train de s'immobiliser ou de stationner entièrement sans empiéter sur les zones de sécurité ni perturber la circulation sur les voies voisines.

Cette distance joue un rôle fondamental dans l'exploitation ferroviaire, car elle garantit la sécurité des manœuvres, facilite le stationnement momentané des trains et contribue à la bonne organisation du trafic sur le réseau.

La distance de garage franc, désignée par GF et exprimée en mètres, se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$GF = 3.57. n + 1m$$

Tel que : $n = \frac{1}{\tan \alpha}$ varie selon le type de l'appareil de voie choisie.

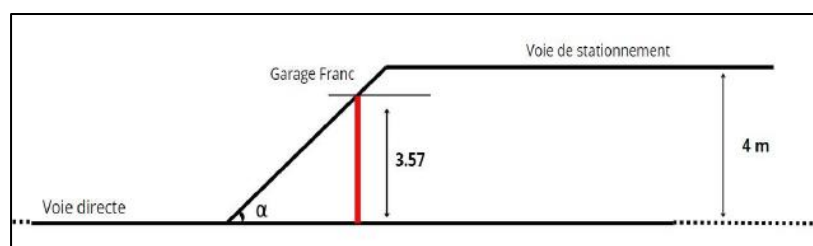


Figure X-1 Schéma d'un garage franc

Pour un appareil de voie de 500-1/12 la longueur du garage franc est la suivante :

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

X.6.4. Longueur utile :

La longueur utile de stationnement correspond à la partie exploitable d'une voie ferrée permettant de recevoir un train dans son intégralité, locomotives et wagons compris, sans dépasser les limites de sécurité ni gêner la circulation sur les voies voisines.

Elle doit garantir des opérations sûres de stationnement, de croisement ou de dépassement, tout en assurant la continuité du trafic ferroviaire.

Selon les normes de la SNTF, la longueur utile minimale est fixée à :

- 426 m pour les trains voyageurs.

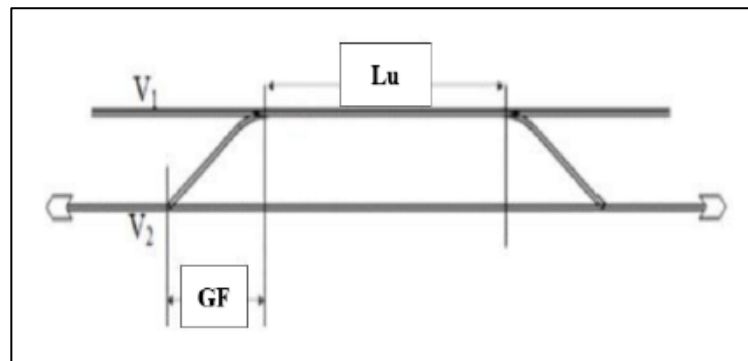


Figure X-2 : Schéma de la longueur utile

X.6.5. Les heurtoirs :

Les heurtoirs appelés aussi des butoirs ou tampons de voie sont des dispositifs de sécurité placés aux extrémités des voies ferrées pour arrêter les trains ou wagons et absorber l'énergie du choc en cas de dépassement. Ils servent à éviter les accidents et à protéger les installations ferroviaires, notamment dans les gares.

X.7. Assainissement longitudinale de la gare :

L'assainissement longitudinal de la gare permet d'évacuer les eaux de ruissellement infiltrées dans le ballast et la plateforme. Il est assuré par des canaux disposés dans le sens des voies, avec une pente de 4%, qui acheminent l'eau vers le réseau d'assainissement grâce à des regards d'inspection.

X.8. Schéma de la gare de Ksar El Boukhari :

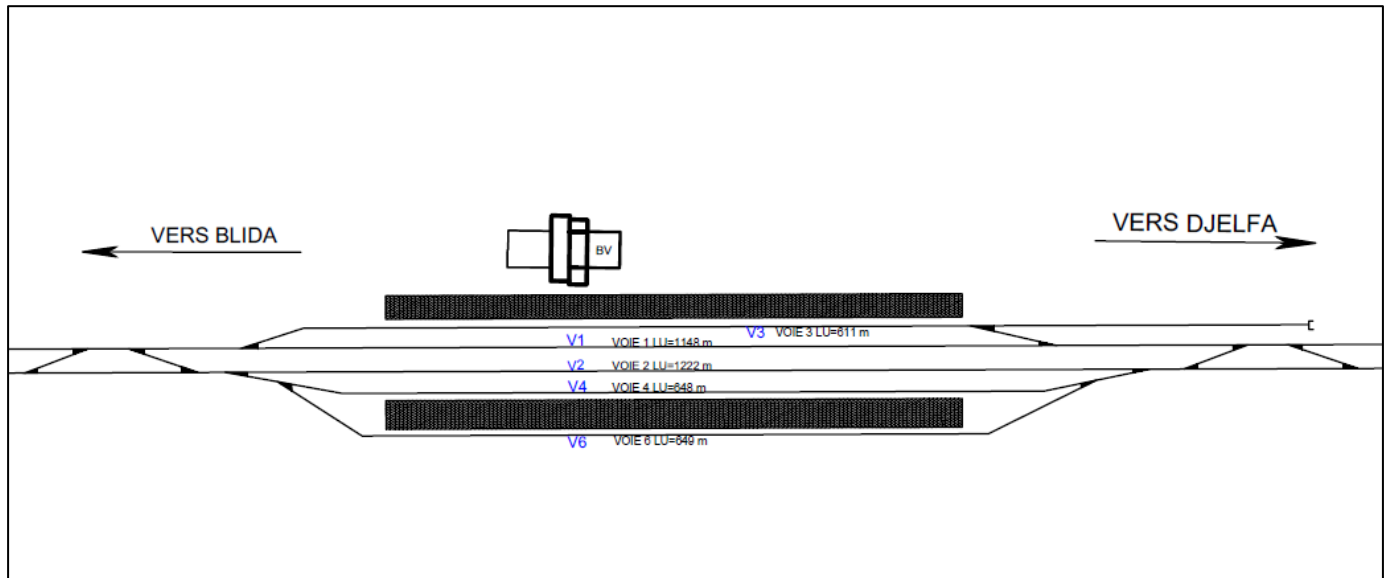
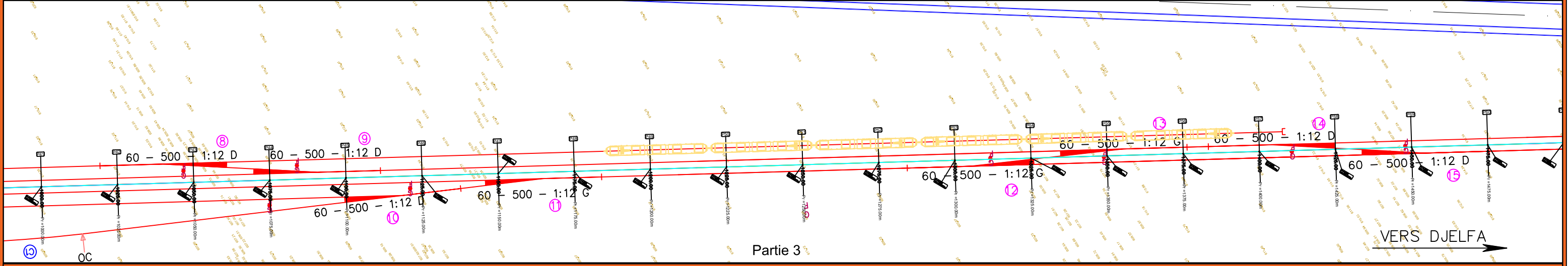
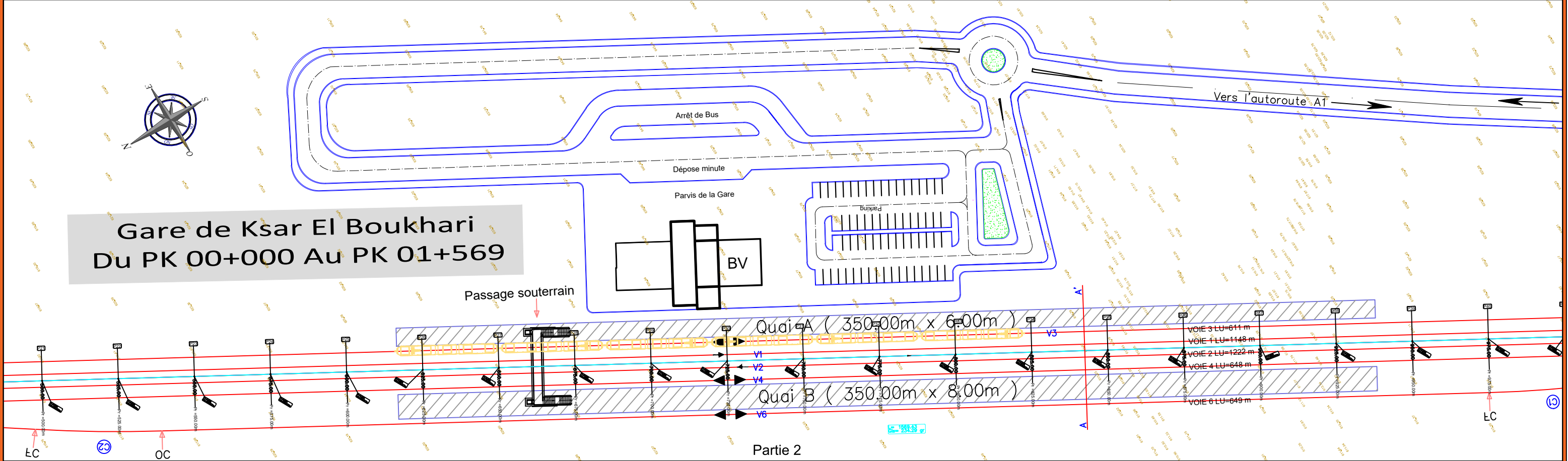
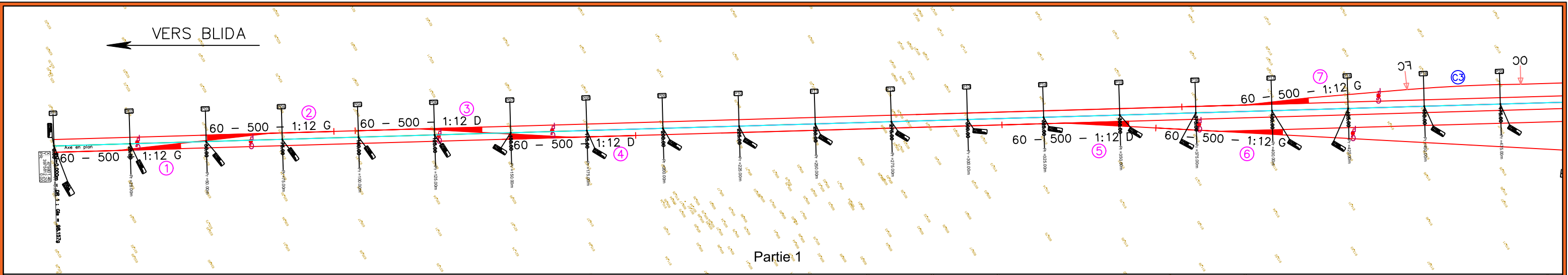


Figure X-3 : Schéma de la gare de Ksar El Boukhari

X.9. Conclusion :

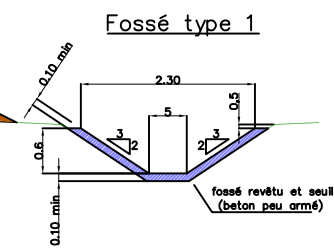
À la fin de ce chapitre, la conception de la gare de voyageurs a été réalisée afin de garantir une organisation fluide des circulations et un confort optimal pour les usagers, tout en respectant les exigences de sécurité ferroviaire. L'aménagement proposé vise à améliorer la qualité du service et à réduire les temps d'attente.

Par ailleurs, l'intégration de dispositifs techniques modernes, notamment la signalisation et les équipements de sécurité, assure un fonctionnement fiable et efficace de la gare. Cette conception permet ainsi d'obtenir une infrastructure durable, performante et adaptée aux besoins actuels et futurs des voyageurs.



 ENSTP الدرسة الوطنية العليا للهندسة والبنية التحتية Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics National School of Built and Ground Works Engineering	Adresse : Rue Sidi Garidi b.p. 32 Vieux Kouba -16051. Alger Fax : (023) 70 19 38 Tel : (023) 70 19 04	Site web : www.enstp.edu.dz E-mail : enstp@enstp.edu.dz	PROJET DE FIN D'ETUDES	Réalisé par	Encadré par	Echelle	N° Planche	Année universitaire
			Etude APD du tronçon KSAR EL BOUKHARI-BOUGHEZOUL de la nouvelle ligne ferroviaire BOUMEDFAA-DJELFA du (PK 0+000 au PK 15+000) et la conception de la gare de KSAR EL BOUKHARI	FENNI Fadi DEHBI Abderraouf	Mr. LAIB Mr. BENMOUCHIARA	1/1250	4	2025 / 2026

ECH:1/100.



Chapitre XI : Signalisation ferroviaire

XI. Signalisation ferroviaire :

XI.1. Introduction :

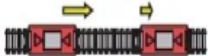
Avec le développement du réseau ferroviaire, la signalisation ferroviaire en Algérie est devenue essentielle pour assurer la sécurité et la gestion du trafic des trains. Dans cette section, nous présenterons les principaux types de signaux et les systèmes de contrôle utilisés.

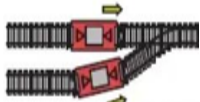
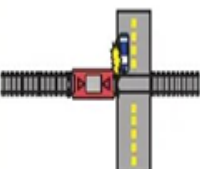
XI.2. Le rôle des installations de signalisation :

- Assurer la sécurité de la circulation ferroviaire.
- Prévenir les risques de collision et de déraillement.
- Réguler et contrôler le trafic des trains.
- Garantir la fluidité de l'exploitation ferroviaire.
- Contrôler la vitesse des trains.
- Sécuriser les aiguillages.
- Protéger les voyageurs, le personnel et les marchandises.
- Améliorer la communication entre les trains et le centre de contrôle.

XI.3. Les risques ferroviaires :

Tableau XI-1 : Les risques ferroviaires

Risque	Configuration	Cas réel	Cause
Nez à nez			Circulation des trains sur des itinéraires insuffisamment sécurisés, sur voie unique ou sur des voies doubles à circulation bidirectionnelle.
Rattrapage			Manque de gestion de l'espacement entre les trains.

Conflit d'itinéraire			Manque de gestion sécurisée des itinéraires sécants.
Déraillement			Vitesse excessive, mauvais état de la voie ou défaillance du matériel roulant.
Choc extérieur			Manque de protection suffisante vis-à-vis de l'environnement extérieur (obstacles).

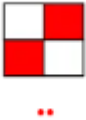
XI.4. Implantation longitudinale :

Pour garantir que les mécaniciens réagissent correctement aux signaux d'arrêt ou aux limitations de vitesse dans des zones spécifiques, il est crucial de les avertir à l'avance. Cela se fait grâce à l'utilisation de signaux d'avertissement à distance, positionnés de manière stratégique en fonction de plusieurs facteurs.

XI.5. Les signaux ferroviaires :

Tableau XI-2 : Les signaux ferroviaires

Signal	Indication	Signalisation Lumineuse	Signalisation mécanique
Signal ouvert Voie libre	Le signal « Voie Libre » indique au conducteur que la circulation en marche normale est autorisée sur la voie.		-

Le feu vert Clignotant (VL)	Il commande au Mécanicien de réduire la vitesse à 160 km/h.		-
Carré fermé et Feux de nuit	Le signal « Carré » impose l'arrêt absolu et ne doit en aucun cas être franchi.		
Feu violet ou Carré violet fermé + Feux de nuit	Commande l'arrêt, il est installé sur les voies de service, son ouverture seule.		
Guidon d'arrêt	-		
Feu blanc	Le feu blanc en signalisation ferroviaire indique que le train est en mode manœuvre .		-
Feu blanc Clignotant	Il interdit dans tous les cas le départ en ligne d'un train.		-
Sémaphore	Il commande au mécanicien de s'arrêter avant le signal.		-
Feu rouge clignotant	En présence d'un feu rouge clignotant, le mécanicien peut avancer en marche à vue sans arrêt, à une vitesse maximale de 15 km/h.		-
L'avertissement/ feux jaune	Commande au mécanicien de freiner pour s'arrêter avant les signaux d'arrêts (Carré, Sémaphore, Carré violet ou Rouge clignotant).		

Le feu Jaune Clignotant (A)	Il commande au mécanicien d'être en mesure de s'arrêter avant le signal annoncé à distance réduite par le signal suivant.		-
--	---	--	---

XI.6. Principe de base de cantonnement :

Le canton est une section de la voie ferrée qui constitue la base du système d'espacement des trains, permettant d'éviter les rattrapages et les risques de collision. La ligne ferroviaire est divisée en plusieurs cantons, chacun étant protégé par un système de signalisation.

Le cantonnement est le dispositif qui assure la séparation des trains circulant dans le même sens sur une même voie. En règle générale, un seul train peut occuper un canton à la fois.

Lorsqu'un train entre dans un canton, ses essieux provoquent un court-circuit entre les deux rails, ce qui est détecté par le système de signalisation. Le signal d'entrée du canton passe alors au rouge.

Lorsque le train quitte le canton et entre dans le canton suivant, le système libère le canton précédent et la signalisation de protection redevient autorisée.

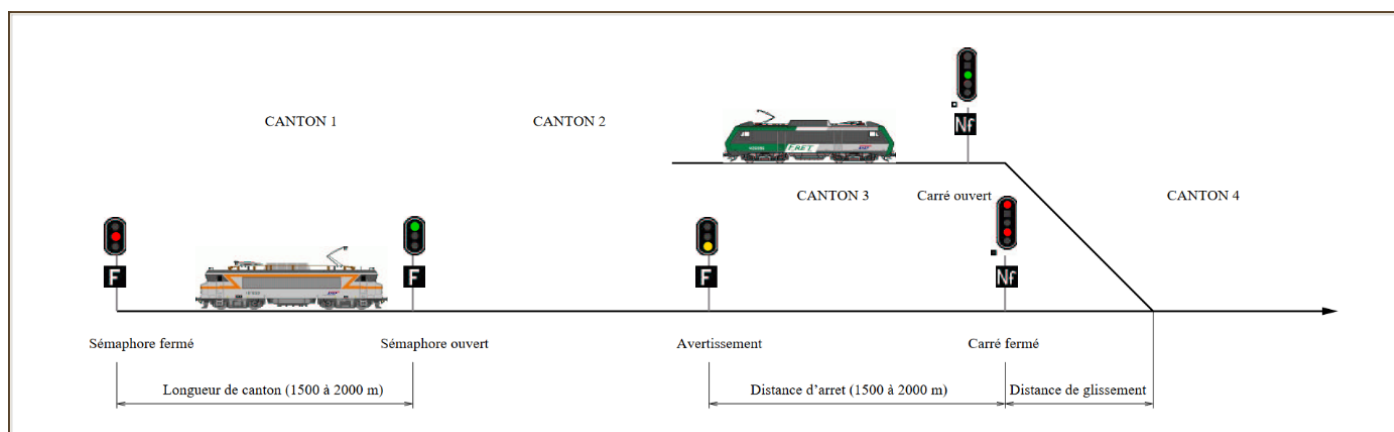


Figure XI-1 Le système de cantonnement

XI.7. Les types de blocs :

XI.7.1. Bloc manuel (B.M) :

Utilisé sur les lignes faiblement fréquentées, L'autorisation d'accès à la voie est donnée manuellement par l'agent à l'aide du signal de bloc.

XI.7.2. Bloc automatique à permissivité limitée (B.A.P.R) :

Utilisé sur les lignes de fréquentation moyenne, L'espacement des trains est assuré par des signaux automatiques permettant l'accès au canton suivant sous conditions de sécurité.

XI.7.3. Bloc automatique lumineux (B.A.L) :

Système principal sur les lignes à fort trafic, La circulation des trains est entièrement contrôlée par des signaux lumineux automatiques selon la position des trains.

- Le **système de cantonnement** est un dispositif de sécurité ferroviaire assurant l'**espacement des circulations** (les trains) sur une même voie. Il consiste à fractionner une ligne en plusieurs sections de voies théoriques ou physiques, appelées **cantons**, dont l'accès est régulé par une **signalisation latérale** (signaux d'arrêt) ou embarquée. Ce mécanisme repose sur le principe de l'**enclenchement** : un canton ne peut être ouvert à un train suiveur que si le train précédent a intégralement **libéré** la section aval, éliminant ainsi tout risque de **rattrapage** (collision arrière).

XI.8. Système de contrôle et de protection ERTMS :

Le système européen de gestion du trafic ferroviaire **ERTMS** est un système de contrôle et de commande qui permet de standardiser et sécuriser la circulation des trains en Europe.

Il permet principalement :

- La transmission des informations de signalisation au train via des balises au sol.
- L'autorisation de mouvement jusqu'au prochain point de contrôle selon un principe de bloc.
- L'échange continu des données de vitesse et de position du train.
- L'amélioration de la sécurité grâce à une communication sol-train automatique.

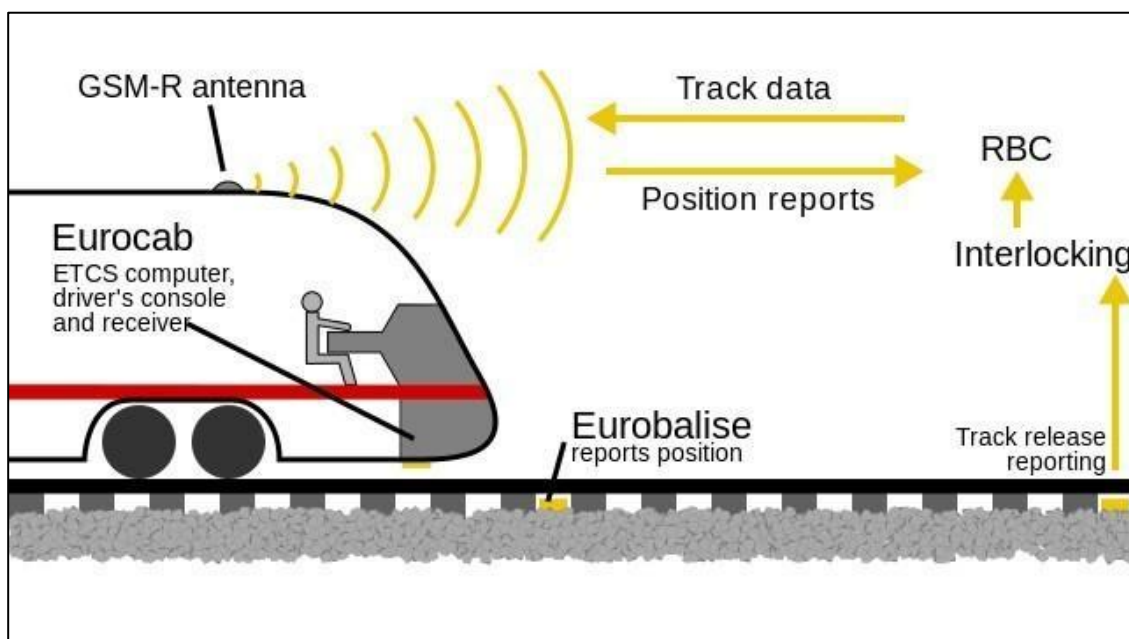


Figure XI-2 le système de contrôle des trains ERTMS

XI.9. Application sur notre projet :

Dans le cadre de notre projet portant sur le tronçon **KSAR EL BOUKHARI – BOUGHEZOUL** de la nouvelle ligne ferroviaire **BOUMEDFAA – DJELFA**, conçu pour une vitesse de référence élevée, le choix d'un système de signalisation performant est indispensable afin d'assurer la sécurité, la fluidité et la capacité du trafic ferroviaire. À cet effet, il a été retenu de combiner la signalisation latérale assurée par le système **BAL (Block Automatique Lumineux)** avec la signalisation embarquée en cabine assurée par le système **ERTMS**. Cette combinaison permet la transmission continue des informations de circulation, notamment les limitations de vitesse, les phases d'accélération et de ralentissement ainsi que les autorisations de mouvement et d'arrêt. Grâce à cette technologie, le conducteur reçoit en temps réel toutes les informations nécessaires à la conduite, ce qui améliore la sécurité, optimise l'exploitation ferroviaire et permet une circulation plus fluide et plus rapprochée des trains.

XI.10. Conclusion :

La signalisation ferroviaire joue un rôle essentiel dans la sécurité, la régulation et l'efficacité du transport ferroviaire. La modernisation des systèmes de signalisation permet d'améliorer la fluidité du trafic, la sécurité des circulations et les performances du réseau ferroviaire.

Chapitre XII : Etude d'impact sur l'environnement

XII. Etude d'impact sur l'environnement :

XII.1. Introduction :

La nouvelle ligne ferroviaire favorisera le développement socio-économique de la région grâce à un transport moderne et efficace, tout en renforçant l'exploitation du réseau ferroviaire. L'étude d'impact présente le projet, analyse ses effets environnementaux et propose des mesures d'atténuation afin de limiter les impacts sur les milieux naturel et humain.

XII.2. Cadre législatif et réglementaire des études d'impact sur l'environnement :

L'Algérie a adopté plusieurs mesures pour protéger l'environnement et encourager le développement durable, notamment à travers la loi de 2003 sur l'environnement. Dans ce cadre, l'étude d'impact sur l'environnement représente un outil important pour évaluer les effets du projet de nouvelle ligne ferroviaire entre Ksar El Boukhari et Boughezoul sur le milieu naturel.

La loi n° 03-10 du 19/07/2003 relative à la protection de l'environnement se distingue par la perspective « de développement durable » qui n'existait pas dans l'ancienne loi.

L'article 15 de cette loi stipule que tout projet de développement, d'infrastructure ou de construction susceptible d'avoir des impacts directs ou indirects sur l'environnement doit faire l'objet, au préalable, d'une étude d'impact ou d'une notice d'impact environnemental. Cette procédure vise à protéger les ressources naturelles, les équilibres écologiques ainsi que le cadre de vie.

L'article 16 définit le contenu de l'étude d'impact sur l'environnement, qui doit inclure une présentation du projet, une analyse de l'état initial du site, une évaluation des impacts sur l'environnement et la santé humaine avec les solutions alternatives, ainsi qu'un examen des effets sur le patrimoine culturel et les aspects socio-économiques. Il prévoit aussi les mesures d'atténuation pour réduire ou compenser les impacts négatifs.

Par ailleurs, un décret précise les modalités de publication de l'étude, le contenu de la notice d'impact, ainsi que la classification des projets : ceux à fort impact soumis à une étude d'impact, et ceux à faible impact relevant de la notice d'impact.

- Cadre réglementaire : le décret exécutif n° 07 -145 du 19/05/2007 :

Le décret exécutif n°07-145 définit les conditions d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et notices d'impact sur l'environnement. Il concerne plusieurs secteurs tels que l'industrie, l'urbanisme, le tourisme, l'agriculture et les infrastructures. Les études d'impact, réalisées aux frais du maître d'ouvrage, doivent analyser les différentes phases du projet, ses effets sur l'environnement et les mesures prévues pour limiter les impacts négatifs.

Le décret précise également les procédures d'examen et d'approbation des études, incluant l'enquête publique permettant de recueillir l'avis des citoyens. Enfin, l'approbation de l'étude d'impact relève du ministre chargé de l'environnement, tandis que la notice

d'impact est validée par le wali compétent. Aucune réalisation du projet n'est autorisée avant cette approbation.

XII.3. Éléments à prendre en compte lors de l'étude d'impact :

XII.3.1. Réglementation relative au bruit et aux émissions dans l'atmosphère :

La réglementation relative aux bruits est prévue dans **la loi n° 03-10 du 19 juillet 2003** relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, **le décret exécutif n° 93-184 du 27 juillet 1993** réglementant l'émission des bruits et **le décret exécutif n° 03-410 du 5 novembre 2003** fixant les seuils limites des émissions des fumées, des gaz toxiques, des bruits par les véhicules automobiles **et la loi n°01-19 du Décembre 2001** relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.

XII.3.2. Déclaration d'Utilité Publique, processus d'indemnisation et mesures compensatoires :

L'indemnisation habituelle, la seule définie par la loi, est une compensation financière. Une compensation en nature peut toutefois être proposée. Le processus d'expropriation ainsi que les compensations en nature possibles sont décrits dans les textes (**notamment la loi n° 91-11 du 27 avril 1991**, fixant les règles relatives à l'expropriation pour cause d'utilité publique et **le décret exécutif n° 93-186 du 27 juillet 1993**, déterminant les modalités d'application de **la loi n° 91-11 du 27 avril 1991**).

XII.4. Description de la zone d'étude :

La zone d'étude concerne le tronçon ferroviaire reliant Ksar El Boukhari à Boughezoul, situé au sud de la wilaya de Médéa. Cette région des Hautes Plaines se caractérise par un relief faiblement ondulé, composé de zones steppiques et de terres agricoles.

Grâce à sa position stratégique, elle constitue un axe de liaison important entre le nord du pays et les régions sahariennes. Le projet ferroviaire vise ainsi à améliorer la connectivité régionale et à soutenir le développement économique et les échanges dans la région.

XII.5. Description de l'état initial de la zone d'étude et de son environnement :

L'état initial de la zone d'étude consiste à définir la situation du milieu avant la réalisation du projet ferroviaire. Cette analyse permet d'identifier les caractéristiques naturelles, biologiques et humaines de la région concernée, notamment le relief, le climat, l'hydrographie, la faune, la flore, l'occupation du sol et les activités humaines.

Elle repose sur des investigations de terrain, des données cartographiques et des informations recueillies auprès des autorités compétentes. Cette étape permet également de mettre en évidence les contraintes et les sensibilités environnementales susceptibles d'être influencées par le projet.

XII.5.1. Description du milieu physique :**XII.5.1.1. Contexte géographique :**

La zone d'étude de la wilaya de Médéa appartient à la région hydrographique Cheliff-Zahrez, caractérisée par un relief varié entre les Hautes Plaines et les massifs telliens. Cette région présente une diversité géologique et hydrologique importante, avec des limites de bassin bien marquées au nord et plus diffuses vers le sud saharien.

XII.5.1.2. Contexte géologique :

La région d'étude appartient au bassin sédimentaire du Chélif, situé entre les massifs telliens du Dahra au nord et de l'Ouarsenis au sud. La zone est composée principalement de formations néogènes et quaternaires influencées par plusieurs phases tectoniques. La région se caractérise également par une activité sismique moyenne liée à l'évolution tectonique du bassin.

XII.5.1.3. Contexte hydrogéologique :

Le bassin hydrographique Cheliff-Zahrez comprend plusieurs nappes d'eaux souterraines exploitées principalement pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Ces ressources, présentes dans différentes formations géologiques, jouent un rôle important dans la région malgré une forte pression liée aux périodes de sécheresse.

XII.5.1.4. Contexte hydrologique :

La wilaya de Médéa appartient principalement au bassin hydrographique Cheliff-Zahrez. Les ressources en eau proviennent des eaux superficielles et souterraines, dont l'exploitation reste limitée par les conditions géologiques. Pour répondre aux besoins en eau potable et en irrigation, plusieurs barrages et retenues collinaires ont été aménagés dans la région.

XII.5.1.5. Climatologie :

La wilaya de Médéa possède un climat méditerranéen semi-continental, marqué par des hivers froids et humides et des étés chauds et secs. Les précipitations sont plus importantes au nord montagneux et diminuent progressivement vers les zones steppiques du sud.

XII.5.2. Description du milieu naturel :**- La faune et la flore :**

La zone d'étude présente un couvert forestier limité, dominé par un usage agricole et pastoral, où la végétation naturelle subsiste principalement sur les reliefs escarpés. Cette végétation est souvent dégradée en maquis et garrigue en raison de la pression anthropique, avec quelques espèces forestières comme le pin d'Alep, le chêne vert et le genévrier.

On distingue également une végétation steppique dominée par l'alfa, ainsi qu'une flore herbacée adaptée aux sols calcaires et peu développés. Les ripisylves des cours d'eau abritent des espèces telles que les saules et les tamaris.

La faune est variée et comprend des espèces résidentes (lièvre, perdrix, sanglier), des prédateurs (renard, chacal) ainsi que certaines espèces menacées comme la gazelle de montagne et le chat sauvage. La région accueille aussi une faune aviaire diversifiée et quelques reptiles protégés.

- **Aires protégées :**

Le lac de Boughezoul et les zones humides situées au sud constituent un site écologique important reconnu par BirdLife comme une zone majeure pour les oiseaux (Important Bird Area), en raison de la diversité des espèces aquatiques migratrices et hivernantes.

Cette zone est également classée site Ramsar, une convention internationale visant la protection et la gestion durable des zones humides d'importance écologique. Ces milieux jouent un rôle essentiel pour la biodiversité et servent d'habitat principal pour de nombreuses espèces avifaunistiques.

XII.5.3. Description du milieu socio-économique :

- **Population et démographie :**

La zone traversée entre Ksar El Boukhari et Boughezoul comprend des centres urbains et des zones rurales à vocation principalement agricole.

Ksar El Boukhari représente un important centre urbain et commercial, tandis que Boughezoul connaît un développement lié aux projets d'infrastructures. Cette dynamique renforce le besoin d'amélioration des réseaux de transport dans la région.

- **Agriculture :**

La région possède d'importantes potentialités agricoles et pastorales grâce à ses ressources naturelles et ses vastes terres agricoles. Elle dispose également d'un patrimoine forestier composé principalement de pin d'Alep et de chêne-liège.

- **Le réseau routier et le transport :**

La wilaya de Médéa dispose d'un réseau routier développé composé de routes nationales, de chemins de wilaya et de chemins communaux assurant les liaisons régionales et nationales. Le transport de voyageurs et de marchandises occupe également une place importante dans les échanges économiques de la région.

- **Activités économiques et investissement :**

La wilaya de Médéa se caractérise par une économie diversifiée reposant sur l'industrie mécanique à Berrouaghia, l'industrie pharmaceutique, les unités agroalimentaires ainsi que les minoteries à Ksar El Boukhari.

Par ailleurs, la région connaît un développement progressif des investissements dans plusieurs secteurs, notamment l'industrie et les infrastructures, ce qui contribue à renforcer son attractivité économique et à soutenir la croissance locale.

- **Electrification et gaz :**

La wilaya de Médéa dispose d'un réseau d'électrification et de gaz en développement, avec plusieurs localités raccordées, dont Ksar El Boukhari. Ces infrastructures contribuent à améliorer le cadre de vie et le développement de la région.

- **Tourisme :**

La wilaya de Médéa possède un potentiel touristique important grâce à la diversité de ses paysages montagneux et naturels. Elle offre des sites propices au tourisme de nature et de détente, favorisant le développement de l'écotourisme dans la région.

XII.6. Evaluation des impacts prévisibles :

L'évaluation des impacts consiste à analyser les effets du projet sur l'environnement selon les caractéristiques du milieu et les différentes phases des travaux. Elle permet de classer les impacts selon leur importance et d'identifier les éléments sensibles de l'environnement susceptibles d'être affectés par le projet.

- **Identification et évaluation des impacts :**

L'analyse des impacts consiste à identifier les effets du projet sur l'environnement durant les phases de réalisation et d'exploitation. Les impacts sont évalués selon leur intensité, durée et étendue, en tenant compte des composantes du milieu.

Des mesures d'atténuation sont proposées pour réduire les impacts négatifs, puis un impact résiduel est déterminé après leur application.

Composante de l'environnement	Source d'impact et description	Mesures d'atténuation
Milieu physique		
Qualité de l'air	Emissions de poussières : Les travaux de chantier, les terrassements, la circulation des engins et le stockage des matériaux génèrent des émissions de poussières et de gaz d'échappement, pouvant dégrader localement la qualité de l'air. Ces impacts touchent particulièrement les zones proches de Ksar El Boukhari, Boughezoul ainsi que les terres agricoles avoisinantes.	Les mesures prévues consistent principalement à nettoyer les routes du chantier, couvrir les matériaux transportés, entretenir les systèmes anti-pollution des engins et limiter le fonctionnement inutile des moteurs. Ces actions permettront de réduire les émissions de poussières et de gaz d'échappement, avec un impact résiduel négligeable.
Qualité du sol	Les travaux de pré-construction et de construction, notamment les terrassements, excavations, circulation des engins et réalisation des infrastructures ferroviaires, peuvent engendrer des impacts sur les sols et les ressources en eau. Ils peuvent provoquer la compaction et l'érosion des sols ainsi qu'un risque de pollution accidentelle par les hydrocarbures, avec une sensibilité accrue au niveau des plaines alluvionnaires agricoles traversées par le projet. Par ailleurs, les cours d'eau constituent des milieux sensibles susceptibles d'être affectés par la modification du lit des oueds, la contamination des eaux superficielles et l'érosion des berges.	Les travaux sont limités aux zones nécessaires et la circulation encadrée pour réduire l'érosion. Les terrains sensibles doivent être stabilisés rapidement. Les engins doivent être entretenus et les ravitaillements effectués avec précaution afin d'éviter toute pollution accidentelle.
Traversées de zones sensibles		Les travaux doivent éviter les interventions dans les oueds, limiter les emprises. La végétation doit être protégée et les déchets correctement gérés afin d'éviter toute pollution des cours d'eau.
Eaux de surface	Les activités de pré-construction et de construction peuvent impacter les eaux superficielles et souterraines. Elles peuvent entraîner le transport de sédiments, dégradant la qualité des eaux et modifiant la structure des oueds à proximité du projet. Par ailleurs, les interventions peuvent perturber les nappes phréatiques, provoquant une baisse du niveau de l'eau ou l'assèchement de certains puits,	Les travaux doivent limiter la pollution des cours d'eau en contrôlant les sédiments, en évitant les périodes de pluie et en interdisant toute intervention des engins en milieu aquatique.

Eaux Souterraines	ce qui rend cette ressource particulièrement sensible, notamment pour l'agriculture et l'alimentation en eau potable.	Le niveau des puits est contrôlé avant et pendant les travaux pour suivre l'évolution de la nappe. Des mesures particulières sont appliquées en cas de zones de captage.
Paysage naturel	En phase de construction, les travaux et installations de chantier modifient temporairement le paysage et altèrent l'aspect visuel du site, notamment à cause des équipements et des déchets. Le projet traverse également des zones agricoles et forestières, ce qui renforce la sensibilité paysagère de la zone d'étude.	Limiter le déboisement, protéger la végétation et maintenir un chantier propre et clôturé pour réduire l'impact visuel.
Milieu biologique		
Flore	Les travaux de défrichement et de terrassement entraînent une consommation d'espaces naturels et un effet de coupure. Le tracé traverse aussi des zones sensibles, notamment des berges et des milieux forestiers.	Les impacts sont réduits par la protection des espèces sensibles, l'interdiction des installations dans les zones fragiles et le balisage strict des zones de travaux pour limiter l'atteinte aux milieux naturels.
Faune	La faune terrestre et les oiseaux peuvent être perturbés par les travaux de déboisement et la circulation des engins, ainsi que par les activités de construction de la voie ferrée.	Limiter le déboisement, éviter les zones sensibles, prévoir des passages pour la faune, assurer un suivi environnemental et compenser les pertes de milieux naturels.
Couvert forestier	Les travaux de déboisement et la réalisation de l'emprise entraînent une perte du couvert végétal et la coupe d'arbres sur plusieurs zones du tracé.	Limiter le déboisement, bien délimiter les zones de coupe, restaurer les surfaces après travaux et consulter les services forestiers.
Milieu humain		
Milieu urbain	Les travaux peuvent perturber la circulation et générer du bruit, entraînant des nuisances temporaires pour les habitants, notamment à Ksar El Boukhari et Boughezoul.	Limiter les nuisances par une bonne gestion du chantier, le respect des règles de bruit et de circulation, et l'installation d'écrans acoustiques près des habitations.

Milieu agricole	Les travaux peuvent impacter le milieu agricole par la dégradation des sols et des contraintes d'accès. L'impact est localisé et durable.	Limiter les impacts sur les cultures, protéger le drainage, utiliser les accès prévus, remettre en état les sols et indemniser les agriculteurs.
Climat sonore	Les travaux génèrent du bruit et des vibrations liés aux engins, au trafic et aux explosifs, avec des impacts temporaires et localisés.	Limiter les déplacements, respecter les vitesses, entretenir les engins et organiser les tirs de mine avec information préalable des riverains.
Infrastructures et services publics	Les travaux et la circulation des engins peuvent endommager les infrastructures et réseaux, surtout aux croisements avec les voies existantes.	Protéger les biens et réseaux, réparer les dommages éventuels et identifier les services publics sur les plans.
Économie locale et régionale	Le projet peut soutenir l'économie locale via la sous-traitance et les achats locaux, mais cet impact reste limité par la faiblesse du tissu industriel régional.	Encourager le recours aux entreprises locales et régionales, soutenir leur développement et favoriser le recrutement local.

Tableau XII-1 : Evaluation des impacts environnementaux produits par le projet

XII.7. Conclusion :

Ce chapitre a permis d'identifier et d'évaluer les principaux impacts environnementaux du projet. L'analyse montre l'importance de prendre en compte ces effets dès la phase de conception afin de limiter les nuisances sur le milieu naturel et humain. Ainsi, la mise en œuvre de mesures d'atténuation adaptées est essentielle pour assurer un projet respectueux de l'environnement et durable.

Chapitre XIII : Devis quantitatif et estimatif

XIII. Devis quantitatif et estimatif :

XIII.1. Introduction :

La réalisation des infrastructures nécessite des investissements importants, ce qui exige une bonne maîtrise des quantités et des coûts des travaux. Dans ce chapitre, le devis quantitatif et estimatif (DQE) du tronçon étudié sera établi afin d'évaluer les besoins en matériaux, le coût des travaux et la répartition du budget du projet.

XIII.2. Application au projet :

Tableau XIII-1 : Devis quantitatif et estimatif

N°	Désignation des travaux	Unité	Prix unitaire en DA/HT	Quantité	Montant
1	INSTALLATION DE CHANTIER				
1.1	Amenée du matériel et installation générale du chantier	F	404 948 718,82	1,00	404 948 718,82
1.2	Repli du matériel et des installations du chantier	F	157 651 945,00	1,00	157 651 945,00
1.3	Fourniture et installation d'un laboratoire de chantier	F	98 584 722,92	1,00	98 584 722,92
TOTAL 1					661 185 386,70
DEGAGEMENT DES EMPRISES					
2.1	Déplacement ligne électrique à basse tension	Km	1 200 000 ,00	0,338	405 600,00
2.2	Déplacement ligne électrique à moyenne tension	Km	8 000 000,00	1,522	12 176 000,00
2.3	Démolition des bâtis	m ²	15 000,00	4 600,00	69 000 000,00
TOTAL 2					81 581 600,00
3	TERRASSEMENT GENEREAX				
3.1	Déblais en terrain meuble mis en dépôt	m ³	1 200,00	569 351,40	683 221 680,00
3.2	Déblais en terrain rocheux rippable pour la mise en remblai	m ³	30 020,00	632 300,30	18 981 655 010
3.3	Mis en remblai	m ³	676,20	1 133 913,7	766 752 443,9
3.4	Décapage des terres végétale	m ³	750,00	102 187,00	76 640 250,00
TOTAL 3					20 508 269 380
4	ASSISE FERROVIAIRE				
4.1	Fourniture et pose de Ballast	m ³	6 305,00	69 046,20	435 336 291,00
4.2	Fourniture et pose de sous Ballast	m ³	3 341,80	35 135,20	117 414 811,40
4.3	Couche de forme	m ³	2 600,00	75 544,60	196 415 960,00
TOTAL 4					749 167 062,40
5	DRAINAGE ET ASSAINISSEMENT				
5.1	Fossés en béton armé pour l'évacuation des eaux de la plate-forme et des talus.	ML	6 860,00	18 799,94	128 967 588,40
5.2	Semi buse DN 300 mm	ML	5 880,00	5 227, 00	30 734 760,00
5.3	Dalot en béton armé, coupe transversale 3 m x2m	m ³	117 600,00	2 232,00	262 483 200,00
5.4	Buses de tuyaux en béton armé diamètre 1500 mm	ML	156 800,00	901,00	141 276 800,00
5.5	Fourniture et mise en œuvre de tranchée drainant avec buse semi perforée 300 mm et matériaux drainant et géotextile non tissé anti contaminant	ML	19 500,00	700,00	13 650 000,00

TOTAL 5					577 112 348,40
6	TRAVAUX DE VOIE ET DE GARE				
6.1	Fourniture des traverses bi-bloc	U	8 245,00	3 902,00	32 171 990,00
6.2	Fourniture des rails NEUFS U 60 E1 (60.34 kg/m)	Tonne	121 250,00	3 905,83	473 581 887,50
6.3	Fourniture des attaches pour rails U 60 E1	U	1 800,00	200 468,00	360 842 400,00
6.4	Pose de la voie	M	8 500,00	32 365,17	275 103 945,00
6.5	Fourniture des traverses monobloc	U	10 185,00	49 215,00	501 254 775,00
6.6	Fourniture d'un branchement simple UIC 60-500-1:12	U	26 000 000,00	15,00	390 000 000,00
6.7	Pose d'un appareil de voie simple UIC 60-500 1:12	U	553 627,50	15,00	8 304 412,50
6.8	Traverses de Garage Franc	U	40 891,56	15,00	613 373,40
6.9	Soudage Aluminothermique	U	18 915,00	537,00	10 157 355,00
6.10	Soudage électrique	U	17 430,61	2 747,00	47 881 885,67
6.11	Réalisation des quais	ML	150 000,00	700,00	105 000 000,00
6.12	Passage souterrain et ascenseur	F	31 112 909,88	1,00	31 112 909,88
6.13	Réalisation du bâtiment voyageurs de la gare de Ksar El Boukhari	m ²	86 000,00	927,53	79 767 580,00
6.14	Travaux d'aménagement extérieure de la gare	m ²	40 000,00	25 596,00	1 023 840 000,00
6.15	Heurtoir	U	620 000,00	1,00	620 000,00
TOTAL 6					3 340 252 514,00
7	OUVRAGES D'ARTS				
7.1	VIADUC en béton précontrainte	ML	1 850 589,28	2 964,60	5 486 256 979,488
7.2	Pont métallique PRS	ML	3 900 000,00	1 840,00	7 176 000 000,00
7.3	Pont cadre (Portique)	F	181 774 141,73	1,00	181 774 141,73
TOTAL 7					12 844 031 121,218
8	SIGNALISATION ET ELECTRIFICATION				
8.1	Signalisation et électrification	F	255 000 000,00	1,00	255 000 000,00
TOTAL 8					255 000 000,00
TOTAL EN HT					39 016 599 410,00
MONTANT TVA (19%)					7 413 153 888,00
MONTANT TOTAL EN TTC					46 429 753 300,00

➤ **Montant total en TTC :**

Le montant total TTC du présent projet est arrêté à la somme de :

Quarante – six milliards quatre cent vingt - neuf millions sept cent cinquante-trois mille trois cents dinars algériens et zéro centime.

XIII.3. Conclusion :

Ce chapitre a permis d'estimer le coût global du projet, incluant l'ensemble des travaux ferroviaires et des infrastructures de la gare ainsi que les ouvrages d'arts. Ce devis constitue une référence essentielle pour la gestion financière et le suivi de l'exécution du projet.

Chapitre XIV : Planification de projet

XIV. Planification de projet :

XIV.1. Introduction :

L'organisation d'un chantier est une phase essentielle dans la réalisation d'un projet de construction. Elle consiste à planifier et coordonner l'ensemble des travaux afin d'assurer leur bon déroulement, depuis la préparation du site jusqu'à la livraison de l'ouvrage. Une bonne planification avant le début des travaux permet d'optimiser les ressources et de garantir le respect des délais, de la qualité et des conditions de sécurité.

XIV.2. Les objectifs de la planification :

La planification d'un chantier constitue une étape essentielle pour assurer le bon déroulement des travaux tout en respectant les délais, les coûts et les exigences de qualité. Elle permet notamment de :

- Optimiser l'utilisation des moyens humains, matériels et financiers afin d'améliorer la performance du projet.
- Garantir une bonne coordination entre les différents intervenants et une compréhension claire des objectifs techniques du chantier.
- Programmer les différentes tâches selon un enchaînement logique pour assurer une exécution efficace des travaux.
- Prévoir les éventuels problèmes et mettre en place des solutions adaptées afin de limiter les retards et les impacts sur le projet.

XIV.3. Le diagramme de Gantt :

Le diagramme de Gantt est un outil de planification utilisé pour organiser et suivre l'avancement d'un projet. Il représente les différentes tâches sous forme de barres horizontales disposées sur une échelle de temps. Chaque barre indique la durée de la tâche ainsi que sa période d'exécution. Cet outil permet de visualiser clairement les dates de début et de fin des activités, ainsi que les tâches critiques influençant le délai global du projet.

Parmi les principaux aspects à considérer lors de l'élaboration d'un planning Gantt, on peut citer :

- Offrir une vision globale et claire du projet afin de faciliter la compréhension des différentes étapes et des délais prévus.
- Assurer un suivi efficace de l'avancement des travaux en comparant les tâches réalisées avec celles programmées, ce qui permet de détecter rapidement les retards éventuels.
- Améliorer la gestion des ressources humaines et matérielles en identifiant les périodes de surcharge ou de faible utilisation pour mieux répartir les moyens disponibles.

XIV.4. Application sur le projet :

Dans ce projet un diagramme de Gantt a été élaboré à l'aide du logiciel Microsoft Project après l'intégration des différentes données relatives au projet.

Le délai global d'exécution des travaux a été estimé à 669.25 jours, répartis selon les différentes phases suivantes, sachant que certaines tâches sont liées chronologiquement les unes aux autres :

- Ordre de service de démarrage : 0 jours
- Installation de chantier : 30 jours
- Étude d'exécution : 35 jours
- Implantation topographique : 20 jours
- Dégagement des emprises 60 jours
- Terrassement : 384.38 Jours
- Réalisation d'ouvrages d'arts : 559,13 jours
- Drainage et assainissement : 205.38 jours
- Travaux de voie et de gare : 436.38 jours
- Réception provisoire : 30 jours
- Réception définitif (Clôture) : 10 jours

XIV.5. Conclusion :

La planification représente une étape essentielle pour assurer la réussite d'un projet. Dans ce chapitre, les différentes phases de préparation et d'organisation des travaux ont été présentées, depuis la définition des objectifs jusqu'à l'établissement des plannings détaillés. Afin d'assurer la fiabilité et l'efficacité du planning réalisé, l'appui d'ingénieurs spécialisés en planification a été pris en considération.

N°	Mode Tâche	Nom de la tâche	Durée	Début	Fin	Prédécesseurs	Unité	Quantité			2027				2028				2029				2030
									T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1
1		Ksar-Boughezoul sur 15 Km	669,25 jrs	Lun 22/06/26	Ven 25/05/29																		
2		ODS de démarrage	0 jr	Lun 22/06/26	Lun 22/06/26		F	1															
3		Installation de chantier	30 jrs	Lun 22/06/26	Ven 07/08/26																		
4		Installation générale de chantier	30 jrs	Lun 22/06/26	Ven 07/08/26		F	1															
5		Installation de laboratoire	30 jrs	Lun 22/06/26	Ven 07/08/26		F	1															
6		Etude d'exécution	35 jrs	Lun 22/06/26	Ven 14/08/26		F	1															
7		Implantation topographique	20 jrs	Mar 11/08/26	Jeu 10/09/26		F	1															
8		Dégagement des emprises	60 jrs	Mar 01/09/26	Ven 04/12/26		F	1															
9		Terrassement	384,38 jrs	Mar 10/11/26	Lun 17/07/28																		
10		Décapage de terre végétale	35 jrs	Mar 10/11/26	Lun 04/01/27		m^3	102187															
11		Déblai mise en dépôt	140 jrs	Mar 22/12/26	Lun 02/08/27		m^3	569351.4															
12		Déblai mise en remblai	130 jrs	Mar 22/12/26	Ven 16/07/27		m^3	632300.3															
13		Remblaiement	190 jrs	Mar 29/12/26	Jeu 28/10/27		m^3	1133913.7															
14		Fourniture et pose de la CDF	170 jrs	Mar 08/06/27	Lun 06/03/28		m^3	75544.6															
15		Fourniture et pose de sous-ballast	120 jrs	Ven 08/10/27	Mar 18/04/28		m^3	35135.2															
16		Fourniture et pose de ballast	100 jrs	Mar 08/02/28	Lun 17/07/28		m^3	69046.2															
17		Réalisation d'ouvrages d'arts	559,13 jrs	Mar 25/08/26	Ven 02/02/29		ml																
18		Infrastructures	345 jrs	Mar 25/08/26	Lun 28/02/28		F	1															
19		Superstructures	350 jrs	Lun 26/07/27	Ven 02/02/29		F	1															
20		Drainage et assainissement	205,38 jrs	Lun 22/06/26	Ven 14/05/27																		
21		Ouvrages busées	95,38 jrs	Lun 22/06/26	Jeu 19/11/26		ml	901															
22		Ouvrages dallots	100 jrs	Lun 22/06/26	Ven 27/11/26		m^3	2232															
23		Travaux des fossées	47 jrs	Mar 02/03/27	Ven 14/05/27		ml	18799.94															
24		Travaux de voie et de gare	436,38 jrs	Mar 27/04/27	Ven 23/03/29																		
25		Fourniture des rails U 60 E1	190 jrs	Mer 09/02/28	Ven 08/12/28		T	3905.8															
26		Fourniture des traverses	150 jrs	Mer 09/02/28	Jeu 05/10/28		U	53117															
27		Fourniture des attaches	120 jrs	Mar 28/12/27	Jeu 06/07/28		U	200468															
28		Pose de la voie	100 jrs	Jeu 20/07/28	Mer 27/12/28 16		ml	32365.17															
29		Soudage électrique et aluminothermique	90 jrs	Jeu 07/09/28	Lun 29/01/29		U	3284															
30		Pose d'ADV UIC 60-500-1:12	45 jrs	Jeu 11/01/29	Ven 23/03/29		U	15															
31		Heurtoire	1 jr	Jeu 28/12/28	Ven 29/12/28 28		U	1															
32		Réalisation BV et aménagement de la gare	230 jrs	Mar 27/04/27	Jeu 27/04/28 10		m²	1															
33		Réception provisoire	30 jrs	Ven 23/03/29	Jeu 10/05/29 29;19		F	1															
34		Réception définitif	10 jrs	Jeu 10/05/29	Ven 25/05/29 33		F	1															

Projet : Planification de PFE

Réalisée par :
FENNI Fadi
DEHBI Abderraouf

Tâche

Fractionnement

Jalon

Récapitulative

Récapitulatif du projet

Tâche inactive

Jalon inactif

Récapitulatif inactif

Tâche manuelle

Durée uniquement

Report récapitulatif manuel

Récapitulatif manuel

Début uniquement

Fin uniquement

Tâches externes

Jalons externes

Échéance

Avancement

Progression manuelle

MS Project

ENSTP

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études a consisté en l'étude technique d'un tronçon de 15 km, compris entre le PK 0+000 et le PK 15+000, appartenant à la future ligne ferroviaire reliant Boumedfaa et Djelfa. Cette infrastructure stratégique a pour objectif d'assurer le transport de voyageurs du nord vers le sud du pays. Réalisée dans le cadre d'un Avant-Projet Détaillé (APD), cette étude s'inscrit dans la politique nationale de modernisation et de développement du réseau ferroviaire.

Le travail effectué a porté sur les différentes composantes nécessaires à la conception d'une ligne ferroviaire répondant aux exigences de la SNTF et des normes de l'UIC. L'étude a notamment concerné le tracé en plan, le profil en long, les profils en travers, la structure de la voie, les terrassements, les ouvrages hydrauliques, ainsi que les études géotechniques et environnementales. Une attention particulière a été accordée aux contraintes spécifiques du tracé.

Sur le plan technique, la ligne a été conçue pour supporter une charge à l'essieu de 25 tonnes, avec une plateforme adaptée et une voie unique à écartement standard de 1435 mm. Elle permettra un trafic mixte, aussi bien pour le transport des voyageurs que pour celui des marchandises. Les logiciels Covadis, Civil 3D et Geo5 ont été utilisés afin d'optimiser le tracé, d'assurer la stabilité des ouvrages et de garantir un drainage efficace. Par ailleurs, le système de signalisation retenu repose sur un cantonnement automatique moderne intégrant l'ERTMS.

Ce projet nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine de l'ingénierie ferroviaire à travers l'application des normes techniques, des outils de modélisation et des méthodes de conception adaptées aux réalités du terrain. Il représente une proposition technique cohérente et durable pouvant contribuer au développement et à l'exploitation future de la nouvelle ligne ferroviaire.

Bibliographie

Bibliographie

- 1 - Cour voie ferrée de Mr MORSLI « enseignant à l'ENSTP ».
- 2 – Cour de voie ferrée de Mr RAMDANE « enseignant à l'ENSTP ».
- 3 – Cour d'hydraulique et assainissement de Mr RAHMANI « enseignant à l'ENSTP ».
- 4 – UIC 719 R, Ouvrage en terre et couches d'assise ferroviaire, 3^e Edition.
- 5 – UIC 741 OR, Quais des gares à voyageurs- Règles pour l'implantation des bordures des quais par rapport à la voie.
- 6 – IN 0272 (EF 2 C 32) Conception du tracé de la voie courante $V \leq 220$ Km/h, Version 01 du 12/09/2006.
- 7 – IN 0310 Soudage en voie, Edition du 30/05/2001, Document propriété de la SNCF.
- 8 – IN 2915 (EF 2 C 33), Conditions d'armement et de tracé pour la création de LRS.
- 9 – IN 0230 (EF 2 B 34), Conditions d'implantation des appareils de voie unifiés.
- 10 – IN 3278 Référentiel Technique pour la réalisation des LGV – Partie Génie Civil – Tome I - LGV « Voyageurs » Caractéristiques générales, *Édition du 22-03-2006*.
- 11 – UIC 720 R, Pose et maintenance de la voie en long rail soudés.
- 12 – UIC 724 R, Armement pour voie ballastée chargée à 25 tonnes par essieu.
- 13 - ST 590 Indice B, Fourniture de granulats utilisés pour la réalisation et l'entretien des voies ferrées à usage électrifié.
- 14 – SETIRAIL, « Rapport de l'étude géologique et géotechnique ».
- 15 - SETIRAIL, « Rapport de l'étude hydrologique et hydraulique ».
- 16 – Cosider TP « Rapport de l'étude géologique et géotechnique ».
- 17 – Mémoire de voie ferrée de l'ENSTP.
- 18 – Règles parasismiques Algériennes « RPA 2024 ».
- 19 - SNTF, Référentiel technique, version 2, chapitre 7.2.2 : Ouvrages en terre pour plates-formes ferroviaires.
- 20 – SNTF, Référentiel technique, chapitre 6 : Géométrie de la voie.
- 21 – SNTF, Référentiel technique, chapitre 10 : Signalisation et télécommunication, version 2.
- 22 – SNCF, Document Métier Voie – Fascicule 1, IN 2547 (EF 0 A 3), Edition du 15-01-2003.

Annexe

Annexe A : Listing de la géométrie de l'axe en plan

Axe En Plan

Axe : Axe en plan

Elts Caractéristiques			Points de Contacts		
Nom	Paramètres	Longueur	Abscisse	X	Y
Droite 1	Gisement 234.29gr	1569.426	0.000	479801.460	3975812.200
Clothoïde 1	Paramètre -616.441	200.000	1569.426	478996.334	3974465.029
Arc 1	Rayon -1900.000 m	754.473	1769.426	478890.749	3974295.199
	Centre X 477313.354 m				
	Centre Y 3975354.362 m				
Clothoïde 2	Paramètre 616.441	200.000	2523.899	478358.394	3973767.575
Droite 2	Gisement 266.27gr	128.961	2723.899	478187.629	3973663.511
Clothoïde 3	Paramètre 616.441	200.000	2852.860	478076.345	3973598.344
Arc 2	Rayon 1900.000 m	1009.315	3052.860	477905.579	3973494.280
	Centre X 478950.619 m				
	Centre Y 3971907.493 m				
Clothoïde 4	Paramètre -616.441	200.000	4062.175	477245.755	3972746.205
Droite 3	Gisement 225.75gr	844.013	4262.175	477163.829	3972563.781
Clothoïde 5	Paramètre -646.529	110.000	5106.188	476831.616	3971787.900
Arc 3	Rayon -3800.000 m	155.180	5216.188	476787.832	3971686.990
	Centre X 473316.593 m				
	Centre Y 3973233.116 m				
Clothoïde 6	Paramètre 646.529	110.000	5371.368	476721.817	3971546.564
Droite 4	Gisement 230.20gr	739.577	5481.368	476672.047	3971448.469
Clothoïde 7	Paramètre 636.396	150.000	6220.945	476334.243	3970790.545
Arc 4	Rayon 2700.000 m	1191.271	6370.945	476266.971	3970656.482
	Centre X 478702.200 m				
	Centre Y 3969490.437 m				
Clothoïde 8	Paramètre -636.396	150.000	7562.216	476002.239	3969504.887
Droite 5	Gisement 198.57gr	360.685	7712.216	476004.214	3969354.905
Clothoïde 9	Paramètre -636.396	150.000	8072.901	476012.302	3968994.312
Arc 5	Rayon -2700.000 m	797.392	8222.901	476014.277	3968844.330
	Centre X 473314.315 m				
	Centre Y 3968858.779 m				
Clothoïde 10	Paramètre 636.396	150.000	9020.293	475893.179	3968059.115
Droite 6	Gisement 220.91gr	2066.323	9170.293	475846.109	3967916.697
Clothoïde 11	Paramètre 616.441	190.000	11236.615	475179.543	3965960.840
Arc 6	Rayon 2000.000 m	2388.882	11426.615	475121.113	3965780.067
	Centre X 477042.692 m				
	Centre Y 3965225.511 m				
Clothoïde 12	Paramètre -616.441	190.000	13815.498	475820.705	3963642.240
Droite 7	Gisement 138.82gr	994.502	14005.498	475974.700	3963530.983
			15000.000	476789.947	3962961.416
Longueur totale de l'axe 15000.000 mètre(s)					

Annexe B : Listing du profil en long

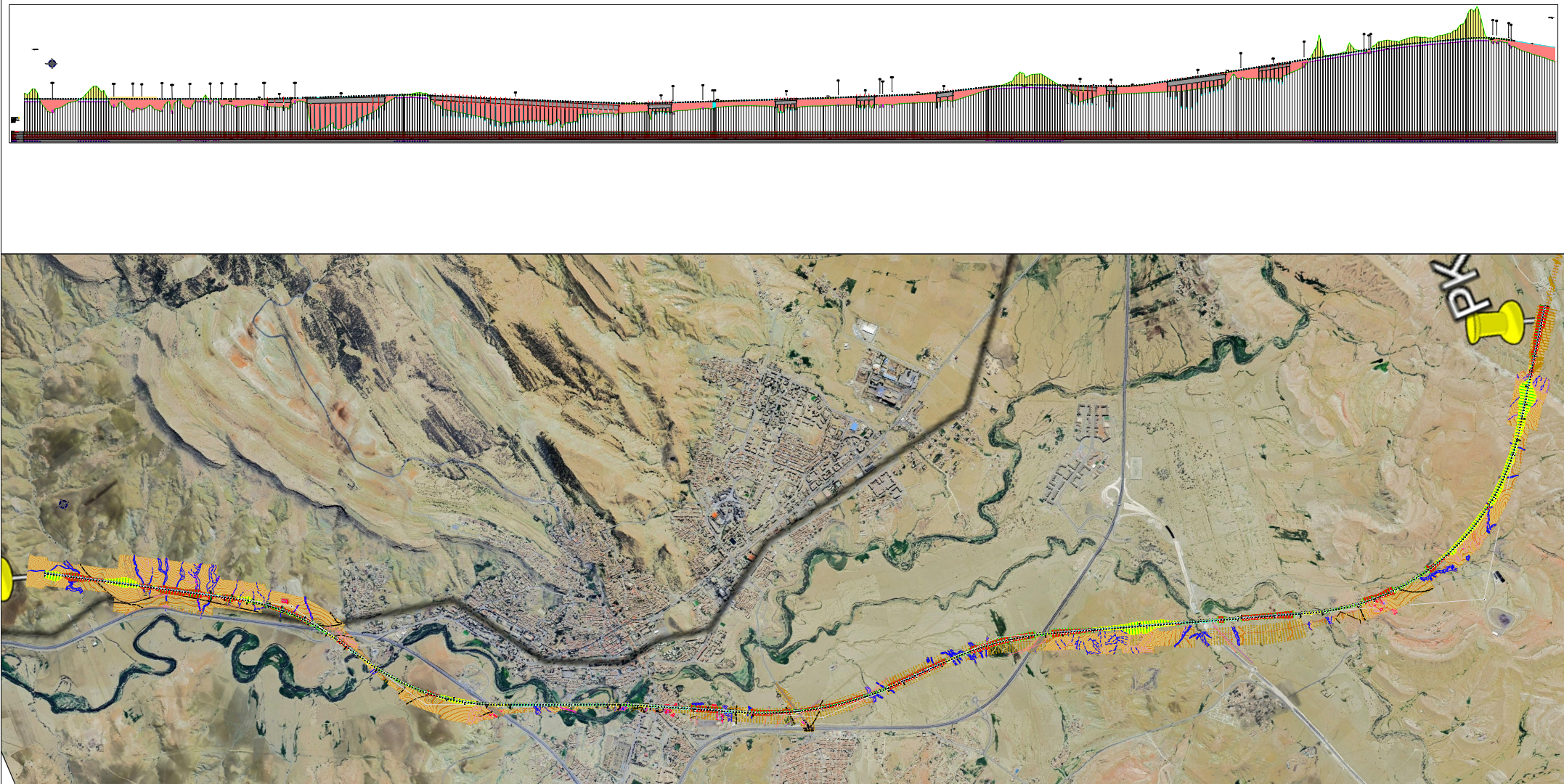
Profil En Long Projet

Elts Caractéristiques			Points de Contacts	
Nom	Pente / Rayon	Longueur	Abscisse	Altitude
Pente 1	Pente 0.00 %	1960.507	0.000	619.817
Cercle 1	Rayon -374226.836 m	126.653	1960.507	619.817
	Sommet Absc. 1960.507 m			
	Sommet Alt. 619.817 m			
Pente 2	Pente -0.03 %	189.293	2087.160	619.796
Cercle 2	Rayon 37411.401 m	125.778	2276.453	619.732
	Sommet Absc. 2289.115 m			
	Sommet Alt. 619.730 m			
Pente 3	Pente 0.30 %	1311.736	2402.231	619.901
Cercle 3	Rayon -19390.559 m	157.580	3713.967	623.867
	Sommet Absc. 3772.595 m			
	Sommet Alt. 623.956 m			
Pente 4	Pente -0.51 %	677.306	3871.547	623.703
Cercle 4	Rayon 142175.649 m	227.783	4548.852	620.247
	Sommet Absc. 5274.384 m			
	Sommet Alt. 618.396 m			
Pente 5	Pente -0.35 %	1084.948	4776.635	619.267
Cercle 5	Rayon 34121.392 m	219.170	5861.583	615.468
	Sommet Absc. 5981.040 m			
	Sommet Alt. 615.259 m			
Pente 6	Pente 0.29 %	686.151	6080.753	615.405
Cercle 6	Rayon 1540107.199 m	205.855	6766.904	617.410
	Sommet Absc. 2266.259 m			
	Sommet Alt. 610.834 m			
Pente 7	Pente 0.31 %	859.809	6972.759	618.026
Cercle 7	Rayon 140855.890 m	122.644	7832.569	620.653
	Sommet Absc. 7402.119 m			
	Sommet Alt. 619.995 m			
Pente 8	Pente 0.39 %	760.554	7955.213	621.081
Cercle 8	Rayon 22622.206 m	159.210	8715.767	624.068
	Sommet Absc. 8626.937 m			
	Sommet Alt. 623.893 m			
Pente 9	Pente 1.10 %	563.720	8874.977	625.253
Cercle 9	Rayon -36699.983 m	463.148	9438.697	631.434
	Sommet Absc. 9841.091 m			
	Sommet Alt. 633.640 m			
Pente 10	Pente -0.17 %	793.339	9901.845	633.590
Cercle 10	Rayon 19165.927 m	322.070	10695.184	632.277
	Sommet Absc. 10726.911 m			
	Sommet Alt. 632.251 m			
Pente 11	Pente 1.52 %	733.527	11017.254	634.450
Cercle 11	Rayon 157516.282 m	133.741	11750.780	645.563
	Sommet Absc. 9364.584 m			
	Sommet Alt. 627.488 m			
Pente 12	Pente 1.60 %	1389.855	11884.522	647.646

Cercle 12	Rayon	-58078.056 m	408.446	13274.377	669.884
	Sommet Absc.	14203.507 m			
	Sommet Alt.	677.317 m			
Pente 13	Pente	0.90 %	448.630	13682.823	674.983

Elts Caractéristiques			Points de Contacts	
Nom	Pente / Rayon	Longueur	Abscisse	Altitude
Cercle 13	Rayon	-17131.204 m	426.733	14131.453
	Sommet Absc.	14285.039 m		679.005
	Sommet Alt.	679.693 m		
Pente 14	Pente	-1.59 %	441.813	14558.187
			15000.000	677.516
				670.470
Longueur totale de l'axe 15000.000 mètre(s)				
Longueur développée totale de l'axe 15000.497 mètre(s)				

Annexe C : Représentation combinée du tracé en plan et du profil en long



Annexe D : Canalisations circulaires partiellement remplies

Q / Q_{p s}	V / V_{p s}	h / D	Q / Q_{p s}	V / V_{p s}	h / D
0,001	0,14	0,02	0,534	1,02	0,52
0,003	0,22	0,04	0,568	1,03	0,54
0,007	0,29	0,06	0,603	1,05	0,56
0,013	0,35	0,08	0,637	1,06	0,58
0,021	0,40	0,10	0,672	1,07	0,60
0,031	0,45	0,12	0,706	1,08	0,62
0,042	0,50	0,14	0,740	1,09	0,64
0,056	0,54	0,16	0,773	1,10	0,66
0,071	0,58	0,18	0,806	1,11	0,68
0,088	0,62	0,20	0,837	1,12	0,70
0,106	0,65	0,22	0,868	1,13	0,72
0,126	0,68	0,24	0,898	1,13	0,74
0,148	0,72	0,26	0,926	1,14	0,76
0,171	0,75	0,28	0,953	1,14	0,78
0,196	0,78	0,30	0,977	1,14	0,80
0,222	0,80	0,32	1,000	1,14	0,82
0,249	0,83	0,34	1,021	1,14	0,84
0,277	0,86	0,36	1,039	1,14	0,86
0,307	0,88	0,38	1,054	1,13	0,88
0,337	0,90	0,40	1,066	1,12	0,90
0,368	0,92	0,42	1,073	1,12	0,92
0,400	0,94	0,44	1,076	1,10	0,94
0,433	0,96	0,46	1,071	1,09	0,96
0,466	0,98	0,48	1,057	1,06	0,98
0,500	1,00	0,50	1,000	1,00	1,00

Annexe E : Classification des sols selon UIC

Classification des sols (identification géotechnique)		Classe de qualité des sols
0.1	Sols organiques	QS0
0.2	Sols fins (comportant plus de 15 % de fines ^a) foisonnés, humides et donc non compactables	
0.3	Sols thixotropes ^b (quick-clay par exemple)	
0.4	Sols comportant des matériaux solubles (sel gemme ou gypse)	
0.5	Sols comportant des matériaux polluants (déchets industriels, par exemple)	
0.6	Sols mixtes "minéraux organiques" ^b	
1.1	Sols comportant plus de 40 % de fines ^a (sauf sols 0.2)	QS1
1.2	Roches très évolutives Par exemple : - Craies de $\rho_d < 1,7 \text{ t/m}^3$ et de friabilité forte - Marnes - Schistes altérés	
1.3	Sols comportant de 15 à 40 % de fines ^a (sauf sols 0.2)	QS1 ^c
1.4	Roches évolutives Par exemple : - Craies de $\rho_d < 1,7 \text{ t/m}^3$ et de friabilité faible - Schistes altérés	
1.5	Roches tendres Par exemple : Si microdeval en présence d'eau (MDE) > 40 et Los Angeles (LA) > 40	
2.1	Sols comportant de 5 à 15 % de fines ^a	QS2 ^d
2.2	Sols comportant moins de 5 % de fines ^a mais uniformes ($C_u \leq 6$)	
2.3	Roches moyennement dures Par exemple : Si $25 < \text{MDE} \leq 40$ et $30 < \text{LA} \leq 40$	
3.1	Sols comportant moins de 5 % de fines ^a	QS3
3.2	Roches dures Par exemple : Si $\text{MDE} \leq 25$ et $\text{LA} \leq 30$	

Annexe F : Les épaisseurs minimales de la couche d'assise

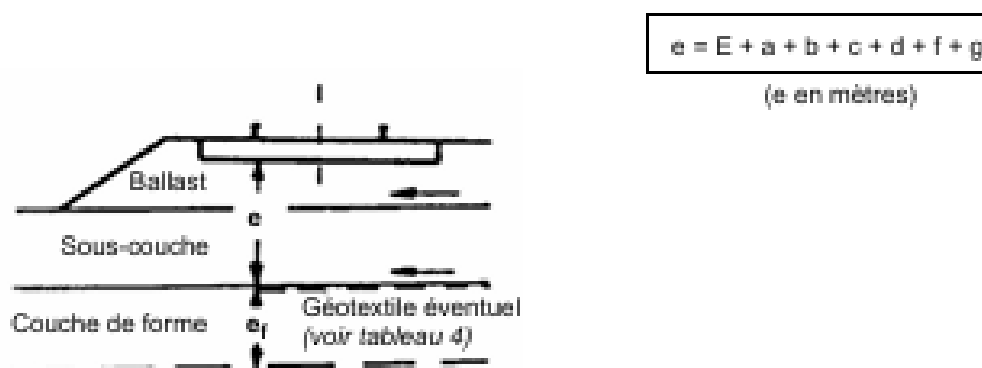


Fig. 9 - Calcul de l'épaisseur minimale "e" des couches d'assise

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.

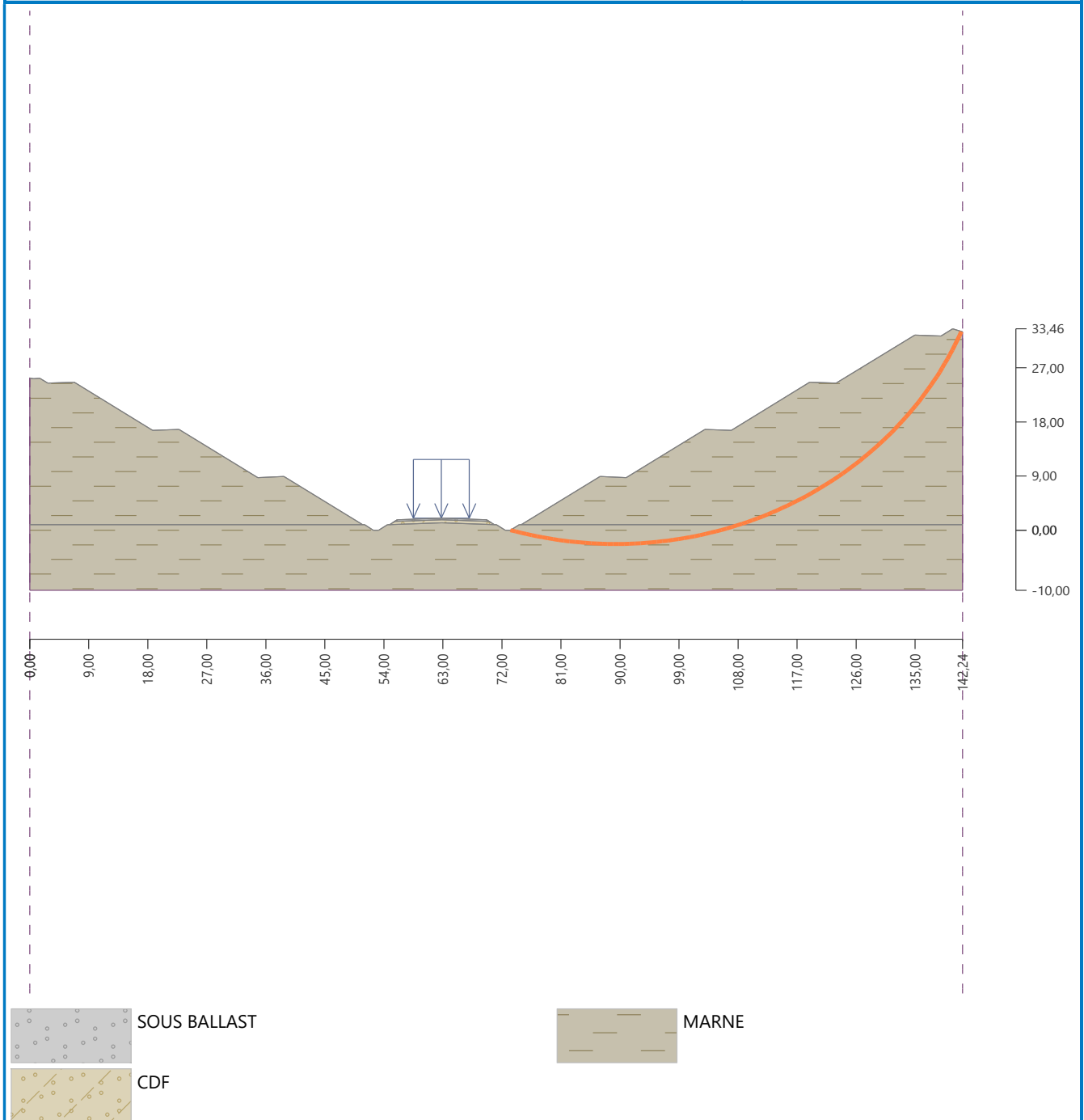
b. Les groupes UIC sont définis dans la fiche n° 714 (édition du 01.01.89) (voir Bibliographie).

c. Les classes de qualité des sols sont définies au tableau 3.

Annexe G : Résultats des études de stabilité des talus

Name : Stabilité de déblai au PK 14+225 (Cas permanent)

Stage - analysis : 1 - 1



The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 6350,05 \text{ kN/m}$

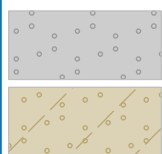
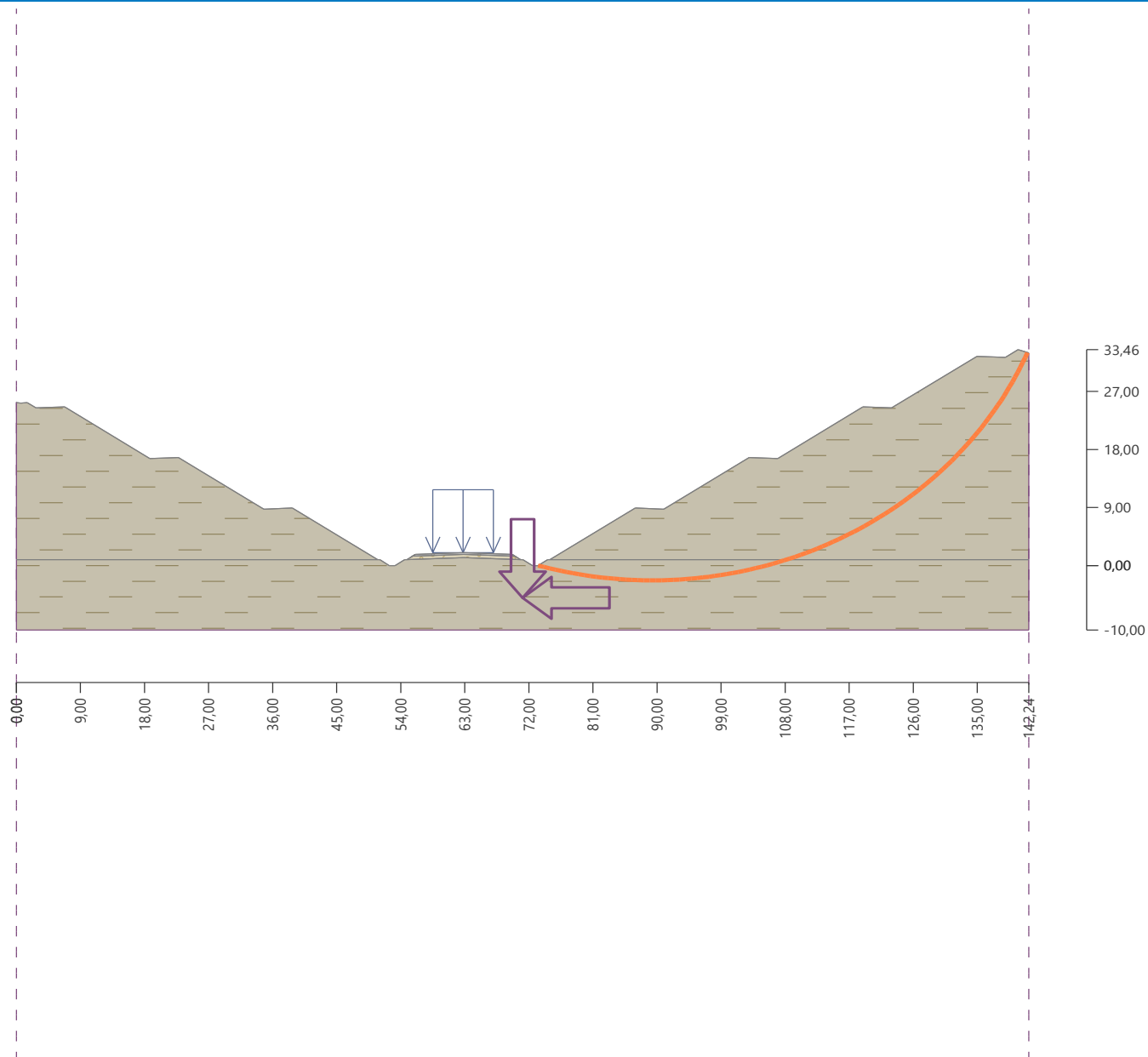
Sum of passive forces : $F_p = 9616,02 \text{ kN/m}$

Sliding moment : $M_a = 361952,59 \text{ kNm/m}$

Resisting moment : $M_p = 548113,28 \text{ kNm/m}$

Factor of safety = $1,51 > 1,50$

Slope stability ACCEPTABLE



SOUS BALLAST

CDF



MARNE

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 7397,87 \text{ kN/m}$

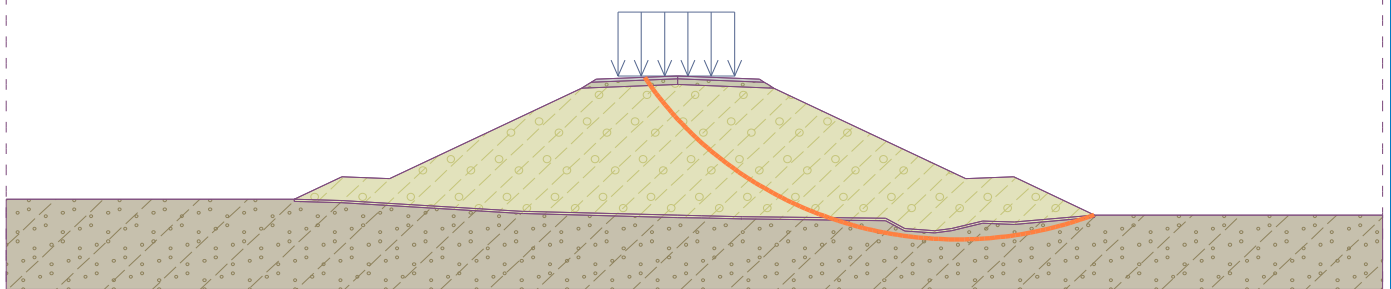
Sum of passive forces : $F_p = 9653,75 \text{ kN/m}$

Sliding moment : $M_a = 421678,78 \text{ kNm/m}$

Resisting moment : $M_p = 550263,62 \text{ kNm/m}$

Factor of safety = $1,30 > 1,10$

Slope stability ACCEPTABLE



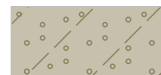
Sous ballast



REMBLAI



CDF



SOL SUPPORT

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 1367,45 \text{ kN/m}$

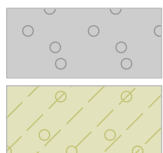
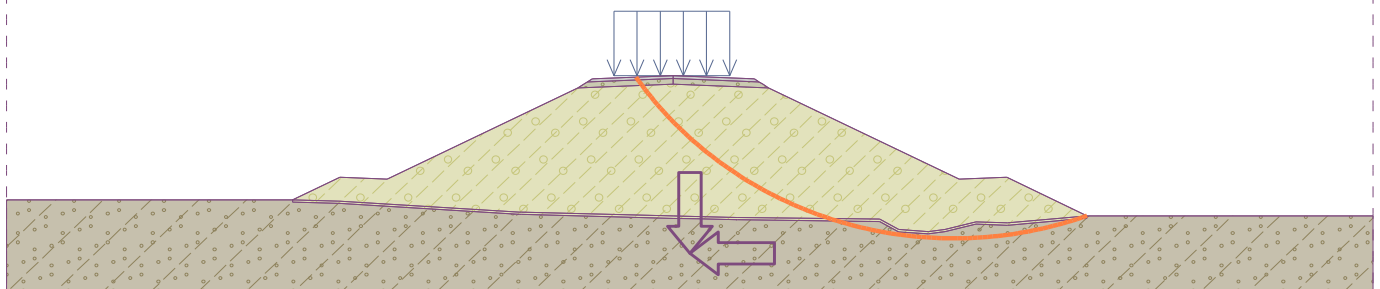
Sum of passive forces : $F_p = 2536,64 \text{ kN/m}$

Sliding moment : $M_a = 42185,75 \text{ kNm/m}$

Resisting moment : $M_p = 78255,36 \text{ kNm/m}$

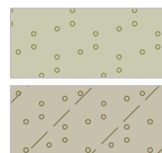
Factor of safety = $1,86 > 1,50$

Slope stability ACCEPTABLE



Sous ballast

REMBLAI



CDF

SOL SUPPORT

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 1629,84 \text{ kN/m}$

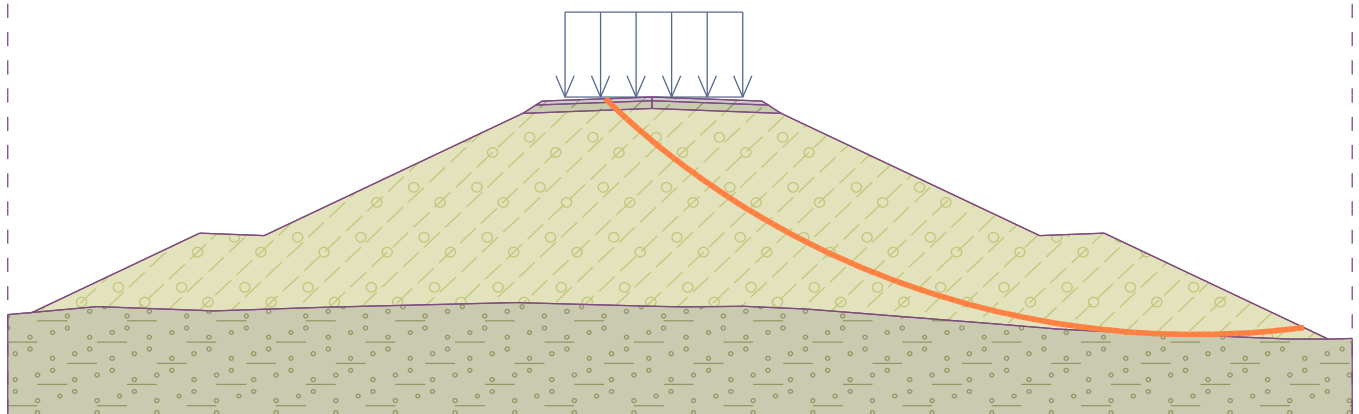
Sum of passive forces : $F_p = 2545,47 \text{ kN/m}$

Sliding moment : $M_a = 52611,28 \text{ kNm/m}$

Resisting moment : $M_p = 82167,63 \text{ kNm/m}$

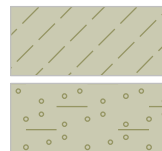
Factor of safety = $1,56 > 1,10$

Slope stability ACCEPTABLE



Sous ballast

REMBLAI



CDF

Sol

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 1490,46 \text{ kN/m}$

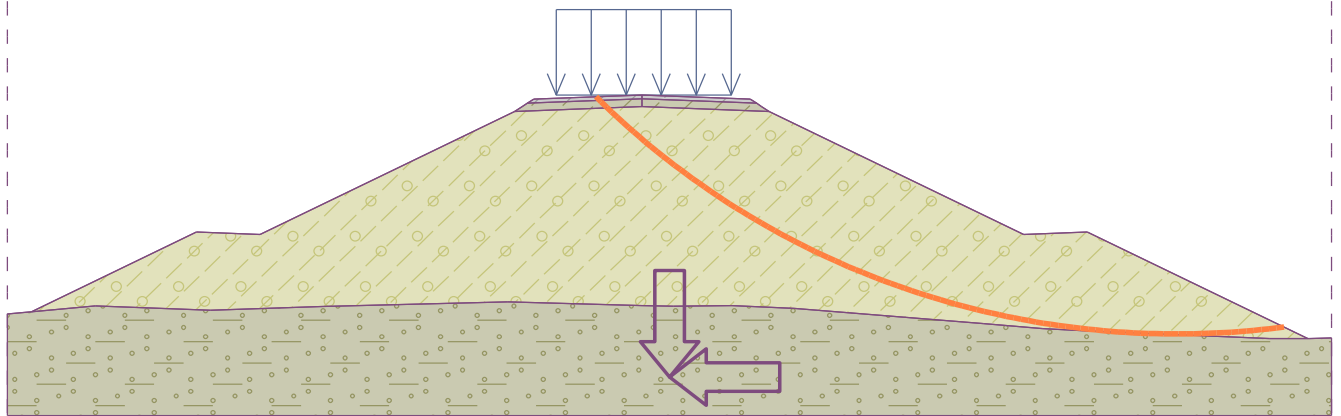
Sum of passive forces : $F_p = 2575,92 \text{ kN/m}$

Sliding moment : $M_a = 75998,38 \text{ kNm/m}$

Resisting moment : $M_p = 131346,09 \text{ kNm/m}$

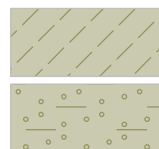
Factor of safety = $1,73 > 1,50$

Slope stability ACCEPTABLE



Sous ballast

REMBLAI



CDF

Sol

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 1781,47 \text{ kN/m}$

Sum of passive forces : $F_p = 2594,35 \text{ kN/m}$

Sliding moment : $M_a = 90837,33 \text{ kNm/m}$

Resisting moment : $M_p = 132285,76 \text{ kNm/m}$

Factor of safety = $1,46 > 1,10$

Slope stability ACCEPTABLE

Annexe H : Matériaux pour les couches selon ST590 B

Fiche n° 1 : Sous-couche pour couche "sous-ballast"

Type de matériau: D2, D3, R21 [1], R41, R61

		lignes parcourues à grandes vitesses V > 160 km/h		autres lignes		Observations
<u>désignation</u>		Grave 0 / 31,5 bien graduée				
Caractéristiques intrinsèques						
résistance		LA+MDE	<= 40	<= 50		
Caractéristiques de fabrication						
dimensions nominales		d	0			
		D	31,5	31,5 (ou 40)		
granularité (fuseau de spécification)		P[2D] P[1,58D] P[D] P[D/2] P[D/5] P[D/10] P[D/20] P[D/50] P[D/100] P [D/200] P[0,08]	100 100 - 99 99 - 85 81 - 55 57 - 31 45 - 23 38 - 17 28 - 11 19 - 8 13 - 6 8 - 4	fuseau de la courbe moyenne P[D/2] : 73 - 65 P[D/5] : 52 - 42 P[D/10] : 40 - 31 P[D/20] : 31 - 22 P[D/50] : 21 - 16 P[D/100] : 15 - 12 P[D200] : 10 - 8		
angularité			Entièrement concassée	>= 95 sec. (sur fraction 6,3/10)		
forme		A	<= 25			
propreté		Vbg	<= 1			
Caractéristiques complémentaires						
compacité			>= 82 %	>= 80 %		
sensibilité au gel			non gélif			
granulats artificiels				[3]		

- [1] L'utilisation de granulats calcaires d'origine géologique autre que "Primaire" doit être soumise à l'accord du Département IG-LG
- [2] La limite inférieure du fuseau de spécification est la même que la limite inférieure du fuseau des graves non traitées routières 0 / 31,5 dures (Norme P 98-129)
- [3] utilisation possible de matériaux de démolition : F71 , sous réserve des recommandations des annexes 1 et 2

Fiche n° 4 : couche de forme de qualité S3 ou Rt3

Type de matériau : B3, C1B, D2, D3, R21, R41, R61, F31, F71

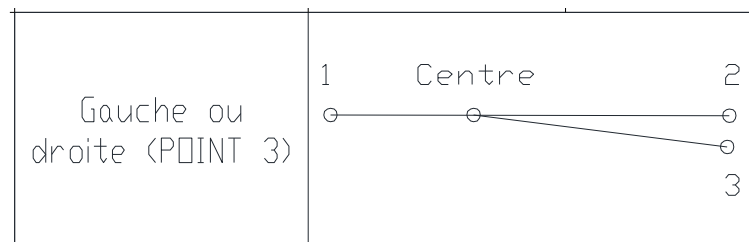
			Observations
désignation		Grave 0/D	[2] voir § 7.6.1
Caractéristiques Intrinsèques			
résistance	R [1]	≤ 60	
Caractéristiques de fabrication			
dimensions nominales	d	0	
	D	20 à 125	
granularité (fuseau de spécification)	P[20] P[Dmax] P[D] P[D/2] P[D/5] P[D/10] P[D/20] P[D/50] P[D/100] P [D/200] P[D/500] P[D/1000]	100 100 – 99 99 – 85 84 – 55 60 – 31 49 – 23 40 – 17 30 – 11 22 – 8 16 – 6 9 – 3 6 - 2	
angularité			
forme	A	≤ 25	
propreté	Vbg	< 2	
Caractéristiques complémentaires			voir § 8.2.3
compacité		$\geq 60 \%$	
sensibilité au gel		[3]	
granulats artificiels		[4]	

[1] $R = LA + MDE$ si $D < 50$ $R = LA + MDA$ si $D \geq 50$ [2] à prendre en compte si $D \geq 63$

[3] Selon la situation géographique il n'est pas toujours nécessaire de vérifier que les granulats utilisés en couche de forme rapportée Rt 3 soient "non gélifs".

[4] Voir recommandations d'emploi en annexes 1 et 2.

Annexe I : Implantation des ADV et courbes circulaire en gare



Appareil N°		01 (60-500-1 :12 G)		02 (60-500-1 :12 G)		03 (60-500-1 :12 D)		04 (60-500-1 :12 D)		05 (60-500-1 :12 D)	
Point		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1		479799.657	3975813.277	479756.069	39757332.156	479752.478	3975726.147	479701.679	3975649.335	479639.969	3975546.080
Centre		479788.988	3975795.425	479766.738	3975750.008	479741.809	3975708.295	479712.348	3975667.187	479629.300	3975528.228
2		479778.319	3975777.573	479777.407	3975767.860	479731.139	3975690.443	479723.017	3975685.039	479618.630	3975510.376
3		479779.838	3975776.749	479775.888	3975768.684	479729.694	3975691.391	479724.463	3975684.092	479617.185	3975511.323
GF		479768.000	3975756.896	479787.726	3975788.537	479717.816	3975671.561	479736.340	3975703.921	479605.307	3975491.494
Tangente		1/12		1/12		1/12		1/12		1/12	
Déviation		Gauche		Gauche		Droite		Droite		Droite	
Cintrage		Droit		Droit		Droit		Droit		Droit	
Voie déviée	R(m)	500		500		500		500		500	
	V(Km/h)	65		65		65		65		65	

Appareil N°		06 (60-500-1 :12 G)		07 (60-500-1 :12 G)		08 (60-500-1 :12 D)		09 (60-500-1 :12 D)		10 (60-500-1 :12 D)	
Point		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1		479611.954	3975504.024	479613.213	3975493.124	479283.909	3974933.932	479233.111	3974857.121	479213.964	3974838.091
Centre		479599.839	3975487.120	479602.544	3975475.272	479273.240	3974916.080	479243.779	3974874.971	479222.245	3974855.315
2		479589.170	3975469.268	479591.875	3975457.419	479262.571	3974898.228	479254.448	3974892.824	479230.527	3974872.539
3		479587.724	3975470.215	479593.394	3975456.595	479261.125	3974899.175	479255.894	3974891.876	479232.045	3974871.711
GF		479575.724	3975450.466	479581.556	3975436.742	479249.247	3974879.346	479267.772	3974911.705	479243.031	3974893.948
Tangente		1/12		1/12		1/12		1/12		1/12	
Déviation		Gauche		Gauche		Droite		Droite		Droite	
Cintrage		Droit		Droit		Droit		Droit		Droit	
Voie déviée	R(m)	500		500		500		500		500	
	V(Km/h)	65		65		65		65		65	

Appareil N°		11 (60-500-1 :12 G)		12 (60-500-1 :12 G)		13 (60-500-1 :12 G)		14 (60-500-1 :12 D)		15 (60-500-1 :12 D)	
Point		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1		479192.307	3974797.033	479140.800	3974710.850	479097.212	3974629.729	479093.621	3974623.720	479042.822	3974546.908
Centre		479202.106	3974813.429	479130.131	3974692.998	479107.881	3974647.581	479082.951	3974605.868	479053.491	3974564.760
2		479211.905	3974829.826	479119.462	3974675.146	479118.550	3974665.433	479072.282	3974588.016	479064.160	3974582.612
3		470210.388	3974830.653	479120.981	3974674.322	479117.031	3974666.258	479070.837	3974588.964	479065.606	3974581.665
GF		479222.891	3974852.063	479109.143	3974654.469	479128.869	3974686.110	479058.959	3974569.134	479077.483	3974601.494
Tangente		1/12		1/12		1/12		1/12		1/12	
Déviation		Gauche		Gauche		Gauche		Droite		Droite	
Cintrage		Droit		Droit		Droit		Droit		Droit	
Voie déviée	R(m)	500		500		500		500		500	
	V(Km/h)	65		65		65		65		65	

Courbe	OC (Origine courbe)		FC (Fin courbe)		Rayon
Coordonnées	X	Y	X	Y	-
1	479268.149	3974950.782	479286.230	3974984.403	500
2	479509.906	3975358.443	479532.690	3975393.424	500
3	479559.649	3975395.311	479578.258	3975427.727	500