

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
فرنسيس جانشون

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Francis Jeanson



Mémoire

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

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Infrastructures de Base

Thème

**Étude en APD de dédoublement et/ou rectification de tracé de la
ligne ferroviaire minière EST section centre (BOUCHEGOUF-
OUED KEBRIT) sur le tronçon PK00+000 au PK20+000 avec
conception de la gare de Souk-Ahras**

Présenté par :

BOUGOUTTAYA Mahmoud
MEKIOUI Chawki Ayoub

Encadré par :

Mr. RAMDANE Ismail

Promotion 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Après avoir rendu grâce à Dieu le Tout-Puissant,

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour leur amour inconditionnel, leur sacrifices inestimables et leur soutien indéfectible. Que ce travail soit l'expression de ma gratitude pour tout ce qu'ils ont accompli pour moi.

J'adresse mes plus sincères pensées à mes frères, **Hichem** et **Oualid**, pour leur présence, leurs encouragements et leur soutien constant qui ont contribué à mon épanouissement personnel et à la réussite de mon parcours.

J'exprime ma plus profonde gratitude à mon grand frère **Sami**, grâce à qui j'ai pu atteindre ce niveau. Son soutien précieux, ses conseils avisés et sa confiance inébranlable ont été une source permanente de motivation. Qu'il trouve ici l'expression de mon respect, de mon admiration et de ma reconnaissance.

Je rends hommage également à la famille **BOUGOUTTAYA**, pour leur soutien et leur affection durant mon parcours.

Je dédie également ce travail à mes neveux, Sanad et Majd, avec tout mon amour et toute mon affection. Je leur souhaite un avenir rempli de réussite, de bonheur et d'épanouissement.

Je consacre également ce travail à mon binôme, **MEKIOUI Chawki Ayoub**, en reconnaissance sincère de sa collaboration précieuse, de son engagement constant et de ses efforts tout au long de ce projet. Sa disponibilité, son sérieux et son esprit de travail en équipe ont fortement contribué à la réussite de ce travail. Je lui exprime ici ma profonde gratitude.

Je dédie également ce travail à mon ami intime **Abd EL Malek**, en témoignage de notre amitié sincère et des souvenirs qui nous unissent depuis toujours.

J'adresse également ce travail à mes amis **Louai, Fadi, Abderraouf, Akram, Issam, Yasser, Majed** et **Raed**, en témoignage de leur amitié, de leur soutien et des moments partagés tout au long de mon parcours.

J'adresse une profonde et respectueuse dédicace à **Mme M. MAHIAOUI**, cheffe de département d'infrastructure de base, en reconnaissance de son encadrement, sa disponibilité, ses conseils et de son accompagnement tout au long de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à l'ensemble de mes camarades ainsi qu'aux enseignants de l'ENSTP pour leur soutien, leurs encouragements et les connaissances qu'ils m'ont transmises tout au long de mon parcours.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire et à l'aboutissement de ce travail.

BOUGOUTTAYA Mahmoud

Dédicace

Je dédie humblement ce travail à ma chère mère, dont la présence, le soutien indéfectible et l'amour inconditionnel ont été pour moi une source inestimable de force tout au long de mon parcours éducatif. Dans les moments les plus difficiles, elle a su m'entourer de son affection, de ses conseils éclairés et de son dévouement sans limites. Grâce à elle, j'ai pu puiser la motivation et les compétences nécessaires pour avancer. Qu'Allah, Le Tout Miséricordieux, la comble de Ses bénédictions, la protège et lui accorde une longue vie en bonne santé. Ma reconnaissance envers elle est infinie.

Je rends également un profond hommage à mon père, qui a consenti tant de sacrifices pour me voir grandir et réussir. Son soutien constant, sa patience et sa force dans les épreuves ont été pour moi une véritable boussole. À lui aussi, j'exprime toute ma gratitude et mon profond respect.

À mon cher oncle, Dr. BOUMAHDI Rachid, pour son encouragement et son soutien inestimables tout au long de mon parcours. Je lui exprime ma profonde gratitude pour ses conseils et sa bienveillance. Qu'Allah le protège, lui accorde santé, paix, bonheur et sérénité.

À mes chères tantes, Dr. BOUMAHDI.F et Dr. BOUMAHDI.Z, je leur adresse mes sincères remerciements pour leur soutien et leurs encouragements. Je leur souhaite une vie pleine de réussite, de santé et de bonheur. Qu'Allah les protège et les comble de Ses bienfaits.

À mon cher binôme, BOUGOUTTAYA Mahmoud, qui m'a accompagné tout au long de notre parcours académique, je lui exprime ma profonde gratitude pour sa collaboration, son soutien et les efforts partagés durant ce travail.

À mes deux sœurs à toute ma famille, de près comme de loin, à mon grand-père et ma grand-mère, qu'Allah leur accorde santé et longévité,

A tous mes amis proches amies **Abderraouf Dehbi, Fadi Fenni, Abderrahim, Zaki Bouaziz, Younes Zerroual, Faiz Bouziane, Djaballah Belhouadjeb, Rafik Bakouche et Ihab Hambli**, je leur exprime ma profonde reconnaissance pour leur soutien.

Je remercie également tous mes camarades ainsi que les enseignants de l'ENSTP.

Enfin, à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, je leur adresse l'expression de ma profonde reconnaissance.

MEKIOUI Chawki Ayoub

Remerciement

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

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nous tenons à remercier toute l'équipe de l'**ENSTP** pour leur soutien inestimable. Nos remerciements particuliers vont à **Mme FC. MEKIDECHE** pour son leadership et son appui continu, ainsi qu'à **Mr F. FEDGOUCHE**. Nous exprimons également notre gratitude à l'administration du département infrastructures de base : **Mme I. MAKOUDI**, **Mme M. BOUREBIA** et **Mme S. LOUNES** pour leur dévouement et leurs précieux conseils. Leur contribution a été essentielle à la réussite de notre projet.

Ainsi, nous remercions notre encadreur **Mr I. RAMDANE**, pour son aide précieuse et son suivi minutieux, ainsi que tous nos professeurs pour leur dévouement, leurs remarques, leurs conseils, leurs réponses et leurs instructions tout au long de notre parcours d'études à l'école. Également nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à **Mr R. MORSLI** pour son soutien précieux, ses remarques éclairées et son encouragement indéfectible.

C'est avec gratitude que nous adressons nos sincères remerciements à **Mme M. MAHIAOUI** le chef de département d'infrastructure de base pour son accompagnement, sa disponibilité et son engagement tout au long de notre parcours en spécialité.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Mr Mustapha Imad Eddine. KERRI**, directeur de projet, ainsi qu'à l'ensemble de l'équipe de l'**ANESRIF** pour leur accueil chaleureux et leur accompagnement à la réussite de notre projet.

Ainsi, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à l'entreprise de la **SNTP** pour l'opportunité qui nous a été offerte d'effectuer notre stage au sein de cette entreprise. Nous adressons nos sincères remerciements à **Mr N. NOUIOUA** directeur de l'entreprise ainsi qu'à **Mr A. BOUKECIRA** chef du grand projet pour leur accueil, leur encadrement et leur disponibilité tout au long de ce stage. Nous remercions également les ingénieurs **Mr A. BOUZARA** et **Melle F. AMROUCHE** pour leur accompagnement, leurs conseils et leur soutien précieux durant la période de stage.

Nous remercions l'équipe de **COSIDER**, **SETIRAIL** et **INFRARAIL** pour leurs efforts et le temps qu'ils ont consacré à partager leur expérience professionnelle.

Enfin, nous exprimons notre gratitude envers les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre modeste travail.

ملخص

يتمثل المشروع موضوع هذه المذكرة في إعداد المشروع التمهيدي التفصيلي المتعلق بتثنية وتصحيح المسار لرفع قدرة استيعاب الخط المنجمي الشرقي، وتحديدًا في المقطع المركزي الرابط بين بوشقوف ووادي الكبريت من النقطة الكيلومترية 00+000 إلى النقطة الكيلومترية 20+000 مع تصميم محطة سوق أهراس وقد تم تحديد الخصائص التقنية الأكثر ملائمة بناءً على توصيات الشركة الوطنية للنقل بالسكك الحديدية ومعايير الاتحاد الدولي للسكك الحديدية وذلك بالاستعانة بالبرامج الهندسية التالية:

CIVIL 3D; COVADIS; AUTOCAD; GLOBAL MAPPER; GÉO5; GOOGLE EARTH PRO;
INFRAWORKS

الكلمات المفتاحية: سكة حديدية. ازدواجية. عصرية. جسر سكي. دراسة محطة قطار. نفق سكي.

Résumé

Le projet objet de ce mémoire consiste en l'élaboration de l'avant-projet détaillé (APD) portant sur le dédoublement et de rectification pour augmenter la capacité de la ligne minière Est, précisément sur la section centre, BOUCHEGOUF-OUED EL KEBRIT du PK00+000 au PK20+000 avec la conception de la gare de Souk-Ahras

L'identification des caractéristiques technique les plus appropriés a été établie sur la base des recommandations de la SNTF et des normes de l'Union Internationale des Chemins de Fer en utilisant les logiciels suivants :

CIVIL 3D; COVADIS; AUTOCAD; GLOBAL MAPPER; GÉO 5; GOOGLE EARTH PRO;
INFRAWORKS

Mot clé : voie ferrée, dédoublement, modernisation, pont rail, étude, gare, tunnel ferroviaire.

SUMMARY

The project presented in this thesis consists of the Preliminary Detailed Design (APD) for the doubling and realignment aimed at increasing the capacity of the Eastern Mining Line. Specifically, it focuses on the central section between BOUCHEGOUF and OUED EL KEBRIT, from PK00+000 to PK20+000, including the design of the Souk-Ahras station.

The identification of the most appropriate technical characteristics was established based on SNTF recommendations and the International Union of Railways (UIC) standards, utilizing the following software suite:

CIVIL 3D; COVADIS; AUTOCAD; GLOBAL MAPPER; GÉO 5; GOOGLE EARTH PRO;
INFRAWORKS

Keywords : railway line, duplication, modernization, rail bridge, study, station, railway tunnel.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. GÉNÉRALITÉS SUR LA SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE

I.1. Le réseau ferroviaire en Algérie	2
I.2. Les composantes de la voie ferrée	2
I.2.1. Le rail	2
I.2.2. Les traverses	2
I.2.3. Le ballast	3
I.3. Le system de fixation des rails	3
I.4. Les appareils de voie	3
I.5. La longueur des rails et des joints	4
I.6. Conclusion.....	4

II. PRÉSENTATION DU PROJET

II.1. Introduction.....	5
II.2. La ligne minière Est.....	5
II.3. Présentation du projet	5
II.3.1. Sismicité.....	6
II.3.2. Le relief.....	7
II.4. Objectifs du projet	7
II.5. Les paramètres de conceptions du projet.....	9
II.6. Matériels roulants	9
II.6.1. Caractéristiques des trains voyageurs	10
II.6.2. Caractéristique des trains marchandise	10
II.7. Conclusion	12

III. ANALYSE DE SITE ET CONTRAINTE DU PROJET

III.1. Introduction	13
III.2. Analyse topographique	13
III.3. Contexte hydrologique et hydraulique	13
III.4. Contrainte foncières et urbaines	13
III.5. Les infrastructures existantes	14
III.6. Conclusion.....	14

IV. ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE

IV.1. Introduction	15
IV.2. Tracé en plan	15
IV.2.1. Critère de limitations des paramètres de tracé en plan	15
IV.2.2. Les conditions et les règles à respecter dans le tracé en plan.....	15
IV.2.3. Les éléments du tracé en plan	16
IV.2.4. Les paramètres géométriques de tracé	16
IV.2.5. Application au projet	21
IV.3. Profil en long	26
IV.3.1. Les éléments de profil en long	26
IV.3.2. Coordination entre profil en long et tracé en plan.....	27
IV.4. Conclusion.....	28

V. ÉTUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

V.1. Introduction	29
V.2. Étude hydrologique.....	29
V.2.1. Présentation générale	29
V.2.2. Les caractéristiques climatiques et pluviométriques	31
V.2.3. Les caractéristiques morphologiques des bassins versants.....	36
V.2.4. Calcul des débits maximaux (Les crues)	39
V.2.5. Résultats de calcul des débits pour le présent projet	44
V.3. Étude hydraulique.....	45
V.3.1. Dimensionnement des ouvrages transversaux.....	46
V.3.2. Dimensionnement des ouvrages longitudinaux.....	51
V.4. Conclusion	54

VI. ÉTUDE GÉOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

VI.1. Introduction	55
VI.2. Étude géologique.....	55
VI.2.1. Carte géologique de la zone d'étude	55
VI.2.2. Aperçu sismique de la zone d'étude.....	56
VI.2.3. Aspect tectonique de la région d'étude	56
VI.2.4. Aperçu géologique local.....	57
VI.3. Étude géotechnique	59

VI.3.1. Contenu de la campagne d'investigation géotechnique	59
VI.3.2. Lithologie de la zone d'étude	61
VI.3.3. Unités géotechniques.....	69
VI.3.4. Interprétations des résultats	71
VI.3.5. Localisation des zones à risques.....	71
VI.3.6. Gites d'emprunts et carrières.....	72
VI.3.7. Etude de la stabilité	73
VI.4. Conclusion.....	75

VII. ASSISE FERROVIAIRE

VII.1. Introduction.....	76
VII.2. Les différents dimensionnements du la couche d'assise.....	76
VII.2.1. Voie ballast	76
VII.2.2. Voie béton.....	76
VII.3. Dimensionnement de la voie sur dalle en béton	76
VII.4. Dimensionnement de la voie ballast	80
VII.4.1. Les différentes couches d'assise ferroviaire pour la voie ballast.....	80
VII.4.2. Classification des sols pour la plate-forme	81
VII.4.3. La classe de portance de la plateforme	82
VII.4.4. Calcul des épaisseurs minimales des couches d'assise.....	82
VII.5. Les avantages et les inconvénients entre les deux dimensionnements	84
VII.6. Conclusion	84

VIII. PROFIL EN TRAVERS

VIII.1. Introduction	85
VIII.1.1. Profil en travers type.....	85
VIII.1.2. Profil en travers courant	85
VIII.2. Les éléments du profil en travers type.....	85
VIII.2.1. Les éléments de la superstructure	85
VIII.2.2. Les éléments de l'infrastructure	86
VIII.2.3. Les éléments du talus.....	86
VIII.2.4. Les éléments d'assainissement	86
VIII.3. Profil en travers de notre projet	86
VIII.4. Calcul des cubatures	86

VIII.5. Conclusion	87
IX. TERRASSEMENTS ET OUVRAGES	
IX.1. Introduction	88
IX.2. Lot terrassements.....	88
IX.2.1. Objectifs des terrassements	88
IX.2.2. Pente des talus en déblai et en remblai.....	88
IX.2.3. Les banquettes	89
IX.2.4. Protection des talus.....	89
IX.2.5. Structure des remblais	89
IX.2.6. Le compactage.....	90
IX.2.7. Réutilisation des matériaux excavés	91
IX.3. Lot ouvrages d'art	91
IX.3.1. Influence du choix des ouvrages d'art.....	91
IX.3.2. Viaducs.....	92
IX.3.3. Tunnels	96
IX.3.4. Le croisement avec rail	99
IX.3.5. Les ouvrages d'art du projet.....	100
X. CONCEPTION DE LA GARE	
X.1. Introduction	101
X.2. Les types des gares	101
X.3. L'emplacement de la gare.....	101
X.4. Conditions de conception des gares.....	102
X.4.1. Installation de la gare pour les voyageurs	102
X.4.2. Installation d'une gare marchandises	102
X.5. Caractéristiques géométriques de la gare	103
X.5.1. Déclivité dans la gare	103
X.5.2. Entraxe des voies	103
X.6. Appareil de voies et configuration ferroviaire.....	103
X.6.1. Choix de l'appareil de voie.....	104
X.6.2. Conditions d'implantation des ADV	104
X.6.3. Le garage franc	105
X.6.4. Marge de glissement.....	106

X.6.5. Longueur utile.....	106
X.6.6. Les heurtoirs	107
X.7. Aménagement de la gare de Souk-Ahras	107
X.7.1. Quai	107
X.7.2. Passage entre les quais.....	108
X.7.3. Accès routier et organisation de la gare.....	109
X.8. Description de la gare de Souk-Ahras	110
X.9. Assainissement de la gare	110
X.9.1. Assainissement transversal	110
X.9.2. Assainissement longitudinal	110
X.9.3. Drainage.....	110
X.10. Conclusion	111

XI. SIGNALISATION FERROVIAIRE

XI.1. Introduction	112
XI.2. Les risques ferroviaires	112
XI.3. Fonctions des signaux	113
XI.4. Implantation longitudinale	113
XI.5. Les signaux ferroviaires	114
XI.6. Principe de cantonnement	115
XI.6.1. Types de cantonnement.....	115
XI.7. Le système de signalisation moderne ERTMS	116
XI.8. Application sur notre projet.....	116
XI.9. Conclusion.....	117

XII. ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

XII.1. Introduction.....	118
XII.2. Cadre juridique et réglementaire applicable	118
XII.3. Description du Site.....	119
XII.4. Situation géographique et administrative de la wilaya de Souk-Ahras	119
XII.5. Ressources physiques biologiques et humaines de la région d'étude.....	119
XII.6. L'impact du projet.....	121
XII.6.1. Les impacts positifs.....	121
XII.6.2. Les impacts négatifs et les solutions d'atténuation envisagées	121

XII.7. Conclusion	123
-------------------------	-----

XIII. DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF

XIV. Planification du projet

XIV.1. Introduction	127
XIV.2. Les objectifs de la planification.....	127
XIV.3. Le diagramme de GANTT	127
XIV.4. Le diagramme de PERT	127
XIV.5. Résumé de notre projet.....	128
XIV.6. Conclusion.....	128

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

LES ANNEXES

Figure I-1 : Réseaux ferroviaire au Nord de l'Algérie	2
Figure I-2 : Le rail	2
Figure I-3 : La traverse	2
Figure I-4 : Le ballast	3
Figure I-5 : système d'attache VOSSLOH.....	3
Figure I-6 : Système d'attache NABLA	3
Figure I-7 : Le principe de l'appareil de voie	3
Figure I-8 : Soudure électrique.....	4
Figure I-9 : Soudure aluminothermique	4
Figure I-10 : Les joints par éclissage.....	4
Figure II-1 : La ligne minière Est	5
Figure II-2 : Les différentes sections de la ligne minière EST.....	6
Figure II-3 : Limites administratives des wilayas entourant la wilaya de Souk-Ahras et le tracé de projet (Rapport hydraulique de SETIRAIL)	6
Figure II-4 : Carte de zonage sismique de l'Algérie (RPOA 2008)	6
Figure II-5 : Carte des altitudes de wilaya de la zone d'étude	7
Figure II-6 : Localisation de la zone d'étude par Global Mapper.....	8
Figure II-7 : Locomotive de train des voyageurs Annaba-Tunis (060DJ02)	10
Figure II-8 : Locomotive de train voyageurs Annaba-Tébessa (060DS13)	10
Figure II-9 : Locomotive pour le train des marchandises (060DT02).....	10
Figure III-1 : Le mosquée.....	13
Figure III-2 : Ligne ferroviaire existante.....	14
Figure III-3 : CW 19 et ligne ferroviaire existante.....	14
Figure III-4 : RN 20.....	14
Figure IV-1 : Éléments constitutifs de l'axe en plan.....	16
Figure IV-2 : Devers-installe pour une voie en courbe	16
Figure IV-3 : Les éléments du tracé en plan.....	20
Figure IV-4: Les contraintes du PK 0+000 au PK 20+00	25
Figure V-1 : Bassin hydrographique N°12 et position de la zone d'étude	30
Figure V-2 : Classification du climat en Algérie.....	31
Figure V-3 : Variation des températures moyennes mensuelles	32
Figure V-4 : Courbe intensité-durée-Fréquence (IDF).....	34

Figure V-5 : Climagramme d'EMBERGER 1990-2004.....	35
Figure V-6 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (Établie d'après Côte M., 1998).	35
Figure V-7 : Carte des sous bassins versants et leur réseau hydrographique traversés par la ligne Souk-Ahras-Oued-El-Kebrit	36
Figure V-8 : Délimitation BV N°16 par logiciel INFRAWORKS 2023.....	39
Figure V-9 : Carte des pentes de la zone traversée par le tracé de la ligne minière, Section Centre, tronçon SOUK-AHRAS – Oued Kébrit.	41
Figure V-10 : Carte géologique de la zone du tracé	42
Figure V-11 : Carte d'affectation des terres sur la région de Souk-Ahras.....	43
Figure V-12 : Schéma d'un ouvrage busé.....	46
Figure V-13 : Schéma d'un dalot	49
Figure V-14 : Fossé de forme trapézoïdale proposé.....	54
Figure VI-1 : Carte géologique de la zone d'étude	55
Figure VI-2 : Carte de zonage sismique selon RPA 2024.....	56
Figure VI-3 : Tronçon du PK 00+000 au PK 04+000 sur la Carte géologiques	57
Figure VI-4 : Tronçon du PK 04+000 au PK 08+000 sur la Carte géologiques	57
Figure VI-5 : Tronçon du PK 08+000 au PK 15+000 sur la Carte géologiques	58
Figure VI-6 : Tronçon du PK 15+000 au PK 20+000 sur la Carte géologiques	58
Figure VI-7 : Les caisses du forage F40-B-OK du PK 00+554 sur la profondeur (0.00m -5.60m)	60
Figure VI-8 : Zone d'emprunt 2.....	72
Figure VI-9 : Zone d'emprunt 1.....	72
Figure VII-1 : Modèle de Zimmermann.....	77
Figure VIII-1 : Profil en travers type.....	85
Figure IX-1 : Remblai en zone inondable	90
Figure IX-2 : Remblai en zone humide	90
Figure IX-3 : Dispositif d'un appareil de dilatation	92
Figure IX-4 : Appareil de dilatation d'une ouverture de 600 mm.....	94
Figure IX-5 : Viaduc N°5 (PK11+790 au PK12+100) réalisé par INFRAWORKS 2023	95
Figure IX-6 : Gabarit cinématique GC	96
Figure IX-7 : Caténaire suspendu.....	98

Figure IX-8 : Sortie du tunnel réalisé par INFRAWORKS 2023	99
Figure IX-9 : Modélisation du passage supérieur au PK19+350 par INFRAWORKS 2023.....	99
Figure X-1 : Localisation de la gare de SOUK-AHRAS	101
Figure X-2 : Zone d’implantation de la future gare de SOUK-AHRAS.....	102
Figure X-3 : Schéma d'un appareil de voie	103
Figure X-4 : Schéma illustratif pour les règles d'implantation des ADV.....	105
Figure X-5 : Schéma illustratif d'un garage franc	105
Figure X-6 : Schématisation de la marge de glissement	106
Figure X-7 : Schéma de la longueur utile.....	107
Figure X-8 : Les heurtoirs	107
Figure X-9 : Hauteur de quai et la distance par rapport à l'axe de quai	108
Figure X-10 : Passage souterrain.....	108
Figure X-11 : Accès routier et organisation de la gare.....	109
Figure X-12 : Ouvrage de drainage	111
Figure XI-1 : Système de cantonnement	115
Figure XII-1 : Les communs de Souk-Ahras	119
Figure XII-2 : L'élevage des moutons (photo prise au PK00+125).....	121
Figure XII-3 : L'élevage des vaches (photo prise au PK00+425)	121

Tableau II-1 : Les paramètres de conception du projet	9
Tableau IV-1 : Le dévers théorique	17
Tableau IV-2 : Le dévers pratique	17
Tableau IV-3 : Le dévers maximum admissible.....	17
Tableau IV-4 : L'insuffisance de dévers	18
Tableau IV-5 : Les valeurs limites de l'insuffisance de dévers	18
Tableau IV-6 : L'excès de dévers	18
Tableau IV-7 : Les valeurs limites de l'excès de dévers.....	18
Tableau IV-8 : La variation de dévers dans les courbes de transition en fonction de la longueur.....	19
Tableau IV-9 : La variation de dévers dans les courbes de transition en fonction de temps	19
Tableau IV-10 : Limite de la variation de dévers	19
Tableau IV-11 : Limite de la variation de l'insuffisance par rapport au temps	20
Tableau IV-12 : Le rayon minimal	20
Tableau IV-13 : Les longueurs minimales des alignements et des pleins courbes	21
Tableau IV-14 : Tableau récapitulatif sur les paramètres géométriques du tracé en plan	21
Tableau IV-15 : Exemple de calcul pour $R=590$ m.....	21
Tableau IV-16 : Tableau récapitulatif des éléments de tracé en plan.....	23
Tableau IV-17 : Les déclivités maximales en fonction de la longueur	26
Tableau IV-18 : La pente moyenne pour une zone	26
Tableau IV-19 : Longueur minimale des déclivités (SNTF).....	27
Tableau IV-20 : Valeurs de Rayon vertical minimal (SNTF)	27
Tableau IV-21 : Tableau récapitulatif des éléments de profil en long	28
Tableau V-1 : Moyenne annuelles et mensuelles des températures à la station de SOUK AHRAS et de Tébessa (source ONM).	31
Tableau V-2 : Pluies journaliers maximales fréquentielles (mm).	33
Tableau V-3 : Pluies annuelles selon les fréquences choisies.	33
Tableau V-4 : Valeur du paramètre de Montana 'a' pour les différentes périodes de retour selon la station de Souk-Ahras	34
Tableau V-5: Valeur du paramètre de Montana 'b' selon la station de Souk-Ahras.....	34
Tableau V-6 : Les caractéristiques des bassins versants	38

Tableau V-7 : Les formules utilisées dans le calcul du débit	40
Tableau V-8 : Valeur de C_1	40
Tableau V-9 : Valeur de C_2	41
Tableau V-10 : Valeur de C_3	42
Tableau V-11 : Les débits de crue retenus des bassins versants pour une période de retour de 100 ans	44
Tableau V-12: Conditions d'auto-curage de l'ouvrage busé (BV N°05)	47
Tableau V-13 : Dimensionnement des buses	48
Tableau V-14 : Dimensionnement des dalots.....	50
Tableau V-15 : Les zones de déblai et remblai les plus défavorables.....	52
Tableau V-16 : Débit de la plate-forme.....	52
Tableau V-17 : Débit de la berme	53
Tableau V-18 : Débit de talus.....	53
Tableau V-19 : Débit total de déblai et remblai	53
Tableau V-20 : Dimensions de fossé proposé	54
Tableau VI-1 : Les essais physiques	59
Tableau VI-2 : Les essais mécaniques.....	60
Tableau VI-3 : Les essais chimiques	60
Tableau VI-4 : Lithologie de la zone.....	61
Tableau VI-5 : Synthèse des résultats géotechniques sur les sondages réalisés pour les essais du forage	63
Tableau VI-6 : Résumé des résultats des essais de laboratoire réalisés sur les échantillons des puits de reconnaissance.....	67
Tableau VI-7 : Résultat de PDL	68
Tableau VI-8 : Les unités lithologique de notre projet du PK00+000 au PK20+000 ..	70
Tableau VI-9 : Gite d'emprunt proposé	72
Tableau VI-10 : Liste des carrières	73
Tableau VI-11 : Les résultats de stabilité des remblais	74
Tableau VI-12 : Les résultats de stabilité des déblais	75
Tableau VI-13 : les hypothèses géotechniques utilisé.....	75
Tableau VII-1 : Calcul de la charge transmise par le rail	78
Tableau VII-2 : calcul du moment fléchissant	79
Tableau VII-3 : La classe de portance de la plate-forme.....	82

Tableau VII-4 : Dimensionnement de la couche d'assise	83
Tableau VII-5 : Structure de la voie du projet.....	83
Tableau VII-6 : Comparaison entre voie béton et voie ballastée	84
Tableau VIII-1 : Calcul des cubatures	87
Tableau IX-1 : Les paramètre de calcul de souffle.....	94
Tableau IX-2 : Liste des ouvrages	100
Tableau X-1 : L'entraxes des voies pour la gare.....	103
Tableau X-2 : Les types des ADV utilisées pour le projet	104
Tableau X-3 : Les conditions des longueurs à proximité d'un OA.....	104
Tableau X-4 : Les valeurs de garage franc	106
Tableau X-5 : Les caractéristiques des quais	108
Tableau X-6 : Les longueurs utiles des voies	110
Tableau XI-1 : Les risques ferroviaires	112
Tableau XI-2 : La signalisation utilisées pour notre projet	114
Tableau XII-1 : Quelques référence légales et réglementaire	118
Tableau XII-2 : Ressource physiques biologiques et humaines de la zone d'étude ...	119
Tableau XII-3 : Les impacts positifs directs et indirects du projet.....	121
Tableau XII-4 : Identification des impacts négatifs du projet et les mesures d'atténuation proposées	122
Tableau XIII-1: Devis quantitatif et estimatif	124
Tableau XIV-1 : Délai d'exécution du projet	128

Abréviation

APS : Avant-Projet Sommaire.

APD : Avant-projet détaillé.

UIC : Union Internationale des Chemins de Fer.

RPOA : Règlement Parasismique des Ouvrages d'Art.

RPA : Règlement Parasismique Algérienne.

SNTF : Société Nationale de Transport ferroviaire.

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

V_v : Vitesse voyageur.

V_m : Vitesse marchandise.

ADV : Appareil De Voie.

LRS : Long Rail Soudée.

FSR : Fil Supérieur du Rail.

PK : Point Kilométrique.

RN : Route Nationale.

CW : Chemin de Wilaya.

CC : Chemin communal.

L_{rp} : Longueur de raccordement progressive.

BV : Bassin Versant.

IDF : Intensité– Durée – Fréquence.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

ONM : Office National de la Météorologie.

NPHE : Niveau des Plus Hautes Eaux.

V_{ps} : Vtesse pleine section.

Q_{ps} : débit pleine section.

GTR : Guide de Terrassement routier.

PDL : Pénétromètre Dynamique lourd.

PU : Puit de reconnaissance.

SP : Sondage pressiométrique.

VBS : Essai bleu de méthylène.

PF : Plate-Forme.

ZI : Zone Inondable.

ZH : Zone Humide.

ZE : Zones d'emprunts.

TN : Terrain Naturel.

ADD : Appareil De Dilatation.

GC : Gabarit Cinématique.

GLO : Gabarit Limite Obstacle.

BV : Bâtiment Voyageurs.

BUD : Bâtiments à usages divers.

BS : Bâtiment de service.

LU : Longueur utile.

GF : Garage Franc.

ERTMS : Européen Rail Traffic Management System.

BAL : Block Automatique Lumineux.

EIE : Etude d'impact sur l'Environnement.

DQE : Devis Quantitatif Estimatif.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

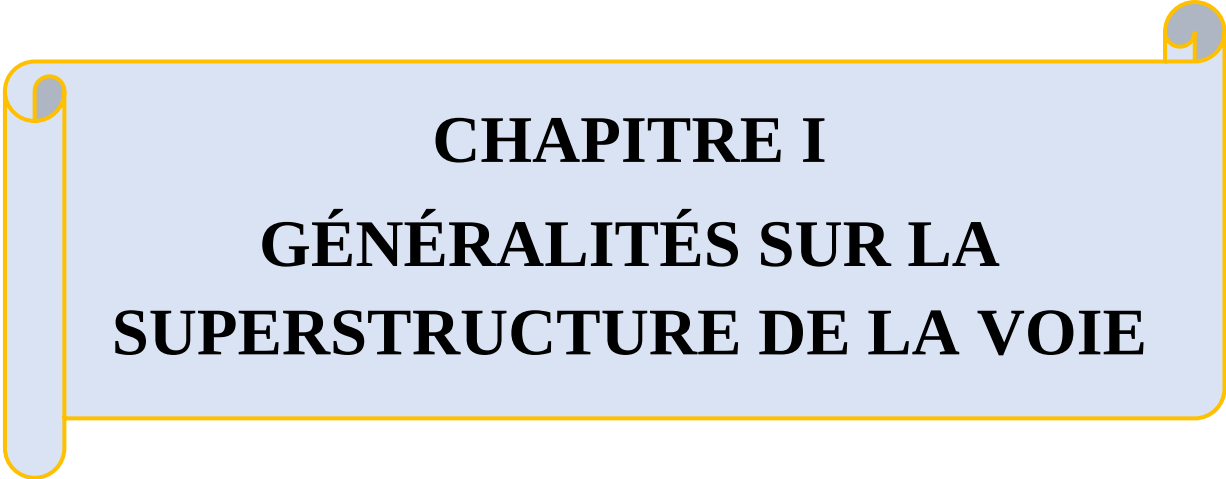
Le réseau ferroviaire algérien constitue un élément essentiel des infrastructures de transport du pays. Il a évolué afin de répondre aux besoins croissants de déplacement des personnes et de transport des marchandises, en tenant compte des contraintes géographiques, économiques et du développement des transports publics.

Dans ce travail, nous présentons une étude en Avant-Projet Détaillé (APD) portant sur le dédoublement et/ou la rectification du tracé afin d'augmenter la capacité de la ligne ferroviaire minière Est, section centre (Bouchegouf – Oued El Kebrit), sur le tronçon du PK 00+000 au PK 20+000, avec la conception de la gare de Souk-Ahras.

La supervision de la réalisation de cette ligne est assurée par l'Agence Nationale d'Études et de Suivi de la Réalisation des Investissements Ferroviaires (ANESRIF).

Ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres : les premiers chapitres présentent les éléments constitutifs de la voie ferrée ainsi que le projet, ses objectifs et l'analyse du site et de ses contraintes. Les chapitres suivants traitent des études techniques (géométrie, hydraulique, hydrologie, géotechnique et géologie), du dimensionnement de l'assise ferroviaire et du profil en travers, ainsi que des terrassements, ouvrages d'art et de la conception de la gare de Souk-Ahras. Enfin, les derniers chapitres abordent la signalisation ferroviaire, l'étude d'impact environnemental, le devis quantitatif et estimatif ainsi que la planification du projet.

En conclusion, ce travail d'APD a permis d'étudier le dédoublement et/ou la rectification du tronçon Bouchegouf – Oued El Kebrit afin d'augmenter la capacité de la ligne ferroviaire minière Est. L'étude a traité les aspects techniques, géométriques et environnementaux du projet. Elle contribue à l'amélioration et à la modernisation du réseau ferroviaire algérien.



CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LA SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE

I. GÉNÉRALITÉS SUR LA SUPERSTRUCTURE DE LA VOIE

I.1. Le réseau ferroviaire en Algérie

Le réseau ferroviaire algérien est un élément clé des infrastructures de transport du pays, géré principalement par la Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF). Il relie les principales villes, ports et zones économiques, en particulier le long de la bande nord du pays mais aussi vers l'intérieur des Hauts Plateaux et certaines zones minières. Ce réseau dessert des axes stratégiques comme ceux reliant Alger à Oran à l'ouest et Alger à Annaba à l'est, en connectant de nombreuses gares et centres urbains pour le transport de voyageurs et de marchandises. Le rail contribue ainsi au développement socio-économique national en offrant une alternative au transport routier. La longueur totale du réseau ferroviaire algérien est d'environ 4 700 à 4 800 kilomètres de voies ferrées (incluant lignes principales, secondaires et extensions récentes).

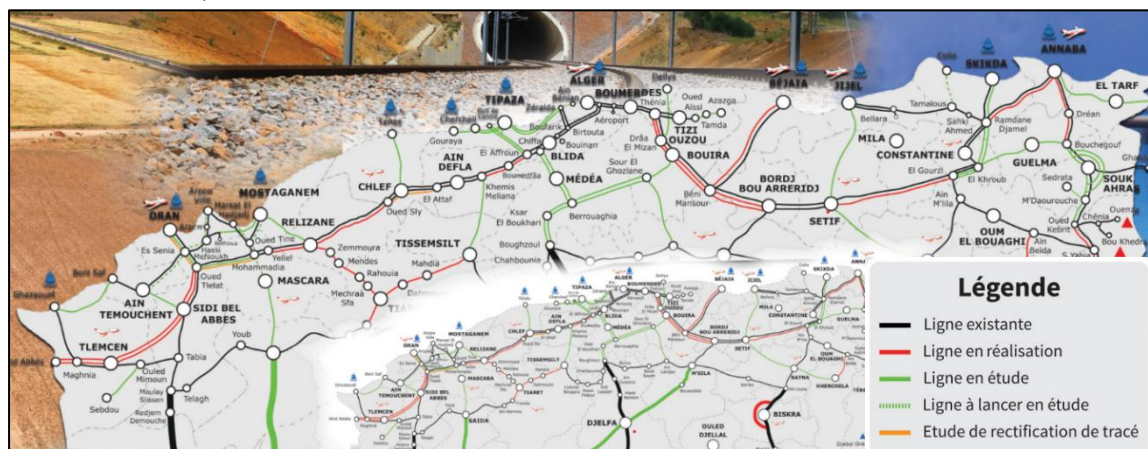


Figure I-1 : Réseaux ferroviaire au Nord de l'Algérie

I.2. Les composantes de la voie ferrée

I.2.1. Le rail

Le rail est une barre d'acier sur laquelle roulent les trains. Il doit être extrêmement résistant à l'usure et à la déformation, car il supporte directement le poids des convois et les efforts dus au passage des roues. Le type de rail le plus courant est le rail à âme pleine, également appelé rail de Vignole, qui assure une grande stabilité mécanique et une longue durée de vie.



Figure I-2 : Le rail

I.2.2. Les traverses

Les traverses jouent un rôle fondamental dans la stabilité de la voie. Elles sont disposées perpendiculairement aux rails et servent à maintenir l'écartement constant entre eux. Les traverses peuvent être en bois, en béton ou en acier, et elles transmettent les charges des rails au ballast, tout en contribuant à la rigidité globale de la voie.



Figure I-3 : La traverse

I.2.3. Le ballast

Le ballast est constitué de pierres concassées placées sous et autour des traverses. Cette couche remplit plusieurs fonctions : elle répartit les charges sur le sol, assure le drainage des eaux de pluie, maintient les traverses en position et amortit les vibrations générées par le passage des trains.



Figure I-4 : Le ballast

I.3. Le system de fixation des rails

Les systèmes de fixation des rails constituent un élément indispensable de toute infrastructure ferroviaire. Ils garantissent le maintien correct et précis des rails, le transfert des charges au sol en toute sécurité et l'amortissement des vibrations et des bruits de structure. Ils doivent non seulement répondre aux exigences les plus élevées en matière de sécurité, de confort et d'efficacité, mais aussi résister à des conditions météorologiques extrêmes et à des charges en constante augmentation.



Figure I-6 : Système d'attache NABLA



Figure I-5 : système d'attache VOSSLOH

I.4. Les appareils de voie

Les appareils de voie ADV ont une des caractéristiques fondamentales du chemin de fer est son mouvement guidé qui n'a qu'un seul degré de liberté. Pour comparaison, les véhicules routiers peuvent facilement changer leur direction grâce à leurs deux degrés de liberté. Pour les véhicules ferroviaires il est donc nécessaire de prévoir un appareillage de voie afin de leur permettre de changer de voie.

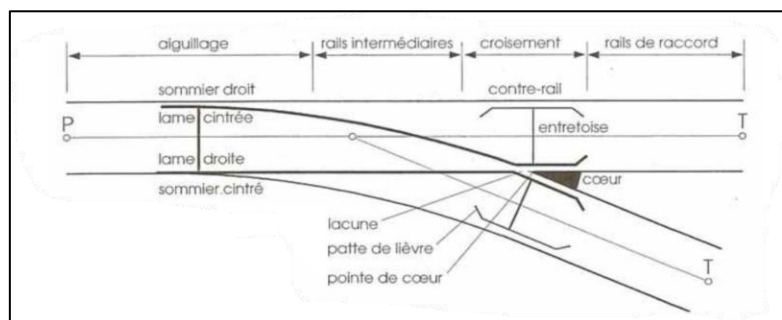


Figure I-7 : Le principe de l'appareil de voie

I.5. La longueur des rails et des joints

La longueur des rails varie selon les méthodes de construction de la voie : dans les voies traditionnelles, les rails sont produits en sections d'environ 18 m à 36 m, car l'industrie sidérurgique fabrique ces longueurs standards pour faciliter le transport et la manutention. L'un des objectifs est d'utiliser les plus grandes longueurs possibles afin de réduire le nombre de joints, car les joints nuisent à la douceur du roulement, augmentent l'usure et exigent plus d'entretien.

Les joints sont les points où deux rails se rencontrent et peuvent être réalisés soit par éclissage (pièces métalliques boulonnées qui assemblent deux rails), soit par soudures électriques ou aluminothermiques pour créer des rails soudés longs (LRS).



Figure I-8 : Soudure électrique



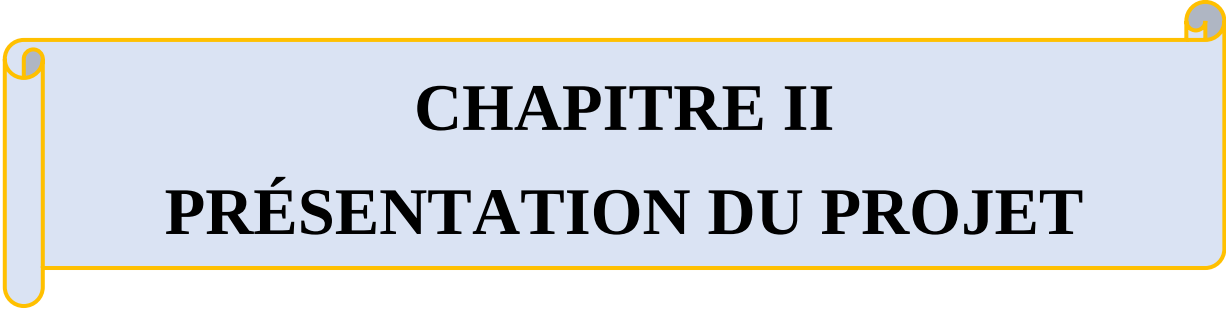
Figure I-9 : Soudure aluminothermique



Figure I-10 : Les joints par éclissage

I.6. Conclusion

En conclusion, les composantes de la voie ferrée forment un ensemble intégré où chaque élément joue un rôle spécifique et complémentaire. Les rails supportent le trafic, les traverses maintiennent l'écartement, le ballast et le sous-ballast assurent la stabilité, tandis que les fixations et les joints garantissent la solidité et la sécurité de la voie.



CHAPITRE II

PRÉSENTATION DU PROJET

II. PRÉSENTATION DU PROJET

II.1. Introduction

La ligne ferroviaire minière de l'Est constitue un axe stratégique pour le transport du phosphate et du fer en Algérie. Des travaux de modernisation, de dédoublement et de rectification sont en cours afin d'améliorer la capacité de la ligne et de fluidifier le trafic ferroviaire. Ce projet contribuera au renforcement du transport des minerais ainsi qu'au développement économique régional et national.

II.2. La ligne minière Est

La ligne ferroviaire minière de l'Est relie le port d'Annaba aux mines de Djebel El-Onk (Tébessa) sur une distance de 422 km, traversant cinq wilayas et desservant plus d'un million d'habitants.

Cette ligne constitue un axe stratégique pour le transport de phosphate et du fer, contribuant au développement économique de la région. Elle est actuellement en phase d'exploitation et modernisation, avec des travaux de dédoublement pour augmenter la capacité et fluidifier le trafic. A terme, la ligne sera prolongée vers la wilaya d'El Oued, permettant de relier le sud-est algérien et d'améliorer l'exportation des ressources minières.

- ⇒ Relie cinq wilaya (Tébessa ; Souk-Ahras ; Guelma ; El-Taraf et Annaba).
- ⇒ Comprend 422 km dont :
 - 175 km achevés.
 - 248 km en cours de travaux.
 - 30 gares et haltes.

Source (ANESRIF)



Figure II-1 : La ligne minière Est

Notre mémoire de fin d'étude propose un projet dédoublement et/ou rectification du tracé pour augmenter la capacité de la ligne ferroviaire minière EST section centre (BOUCHEGOUF-OUED EL KEBRIT).

II.3. Présentation du projet

Le présent projet de fin d'études porte sur l'étude d'un Avant-Projet Détaillé (APD) d'une ligne ferroviaire située dans la wilaya de Souk-Ahras, à l'extrême Est de l'Algérie. Le tronçon étudié s'étend du PK 00+000 au PK 20+000 et comprend la conception de la gare de Souk-Ahras.

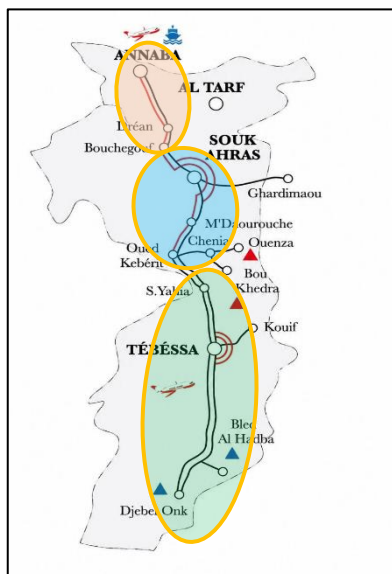


Figure II-2 : Les différents sections de la ligne minière EST

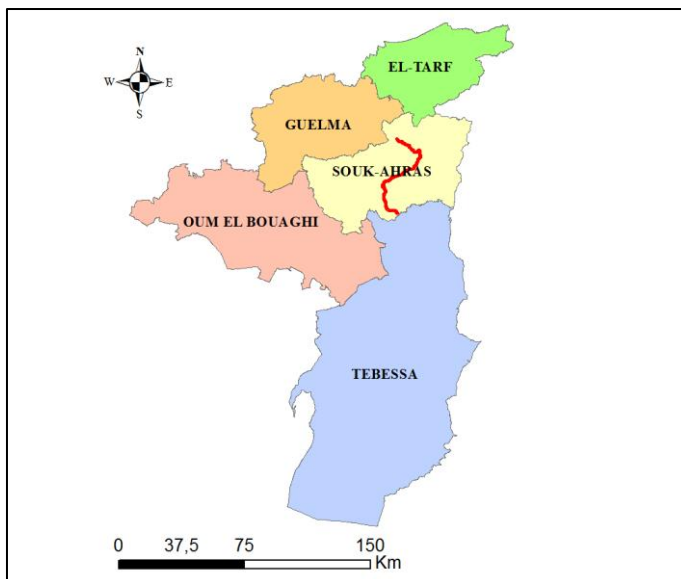


Figure II-3 : Limites administratives des wilayas entourant la wilaya de Souk-Ahras et le tracé de projet (Rapport hydraulique de SETIRAIL)

II.3.1. Sismicité

Selon le Règlement Parasismique Algérien (RPOA 2008) le territoire national est classé en cinq zones sismiques allant de la négligeable à l'élévée. Notre projet est situé dans la **Zone I** (sismicité faible).

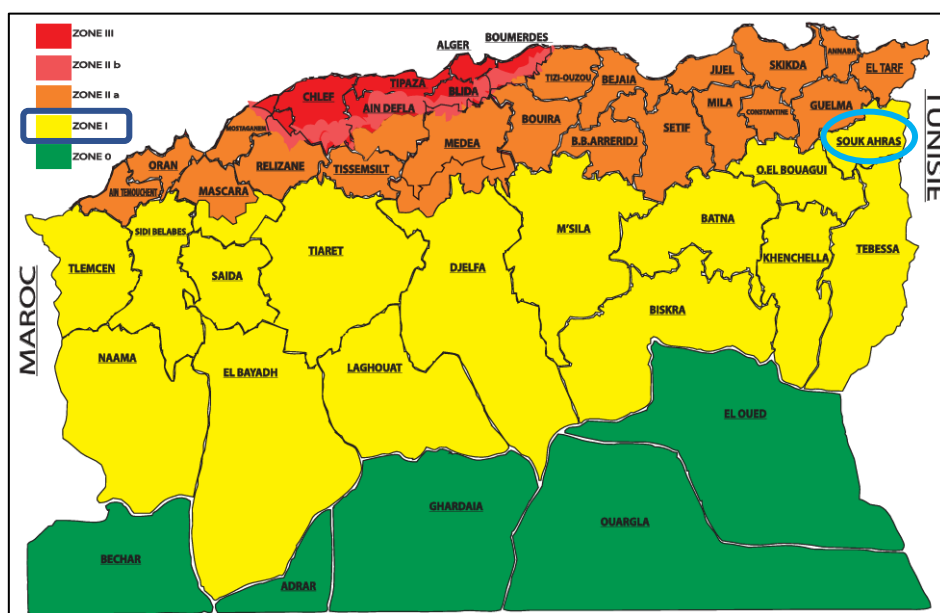


Figure II-4 : Carte de zonage sismique de l'Algérie (RPOA 2008)

II.3.2. Le relief

La wilaya de Souk-Ahras présente un relief diversifié : au Nord, le terrain est montagneux, faisant partie de l'Atlas tellien avec des pentes relativement fortes et une couverture forestière notable ; au Sud, le territoire s'ouvre sur de vastes plaines et hauts plateaux, prolongement des hautes plaines intérieures d'Algérie. Cette organisation topographique résulte d'une alternance de massifs montagneux, de piémonts, de plaines agricoles et de zones de plateaux plus plats, influençant les réseaux de drainage et l'occupation du sol.



Figure II-5 : Carte des altitudes de wilaya de la zone d'étude

II.4. Objectifs du projet

L'objectif principal du projet de la ligne ferroviaire minière Est, qui relie le port d'Annaba à Tébessa (et plus loin jusqu'à Djebel El Onk / Bled El Hadba) sur une distance d'environ 422 km, est de :

- ⇒ Optimiser le transport des ressources minières de la région Est vers les installations portuaires, en particulier pour le phosphate et les minerais stratégiques.
- ⇒ Moderniser, rectifier et dédoubler la voie ferrée existante afin d'améliorer la capacité, la sécurité et la fiabilité de l'exploitation, tout en l'adaptant aux charges lourdes.
- ⇒ Renforcer la capacité et la fluidité du trafic ferroviaire, en permettant la circulation simultanée des trains dans les deux sens et en réduisant les temps d'attente et les congestions.
- ⇒ Soutenir le développement économique régional et national en réduisant les coûts logistiques, en désenclavant les zones traversées et en consolidant le corridor ferroviaire Est.
- ⇒ Limiter le recours au transport routier lourd, en diminuant les impacts environnementaux, l'usure des routes et les coûts d'entretien des routes.
- ⇒ Concevoir la gare de Souk-Ahras comme une gare mixte, facilitant l'exploitation, l'entretien des trains et l'organisation du trafic sur le tronçon central.

⇒ Rectifier le tracé ferroviaire afin que le nouveau tracé ne traverse plus la ville de Souk-Ahras, contrairement au tracé existant, permettant ainsi de réduire les nuisances urbaines, d'améliorer la sécurité et d'optimiser les conditions d'exploitation de la ligne.

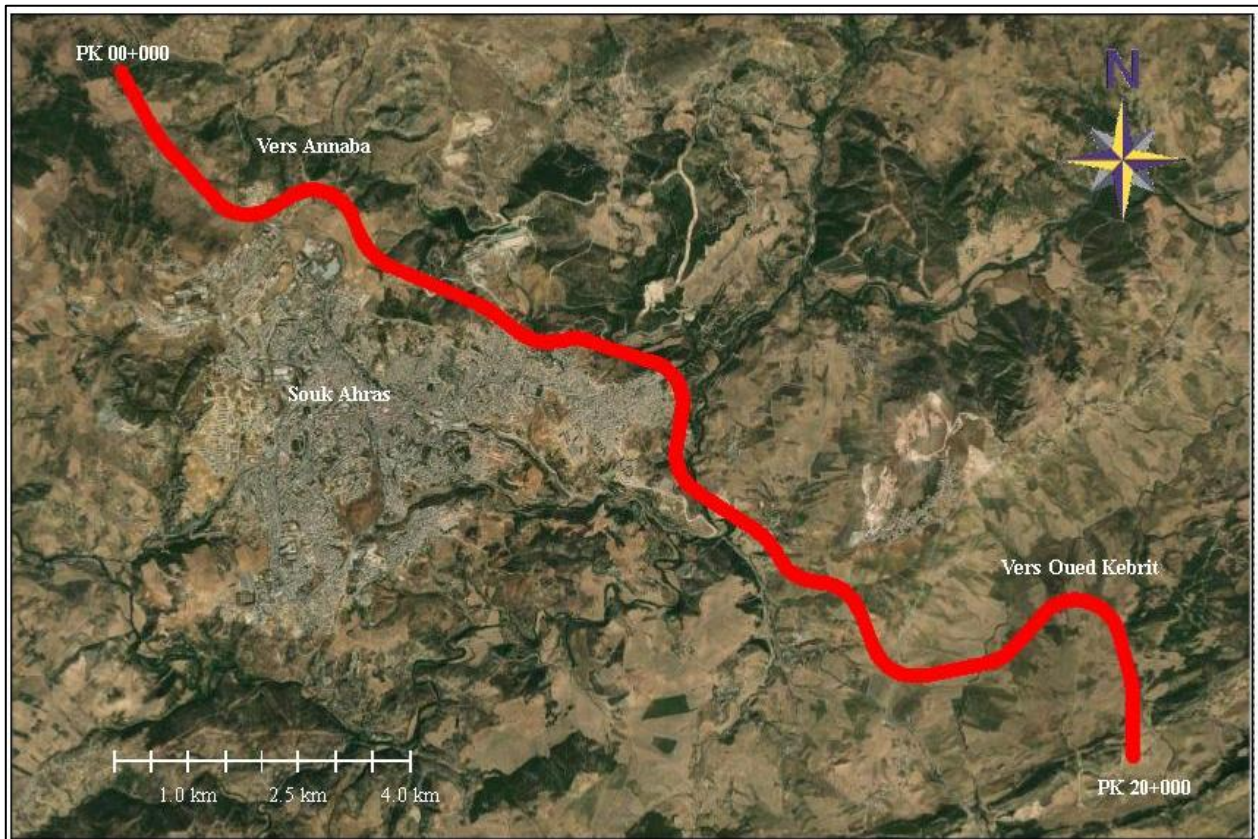


Figure II-6 : Localisation de la zone d'étude par Global Mapper

II.5. Les paramètres de conceptions du projet

Les paramètres adoptés pour la conception du tracé du tronçon Souk-Ahras Oued-El-Kebrit sont représentés dans le tableau suivant (**Tableau II-1**)

Tableau II-1 : Les paramètres de conception du projet

Paramètres	Caractéristique
Tronçon Souk-Ahras Oued-El-Kebrit	Double voie
Type du trafic	Mixte
Longueur du tronçon étudié	20 km
Vitesse des trains de voyageurs	120 km/h
Vitesse des trains de marchandises	80 km/h
Charge à l'essieu	22.5 tonnes
Système d'attache	Type NABLA et VOSSLOH
Traverses	Bi-bloc (Type VAX31) / Monobloc
Traction	Electrique / Diesel
Rail	UIC 60 E1
Ecartement	1435 mm
L'entre axe	4,20 m

II.6. Matériels roulants

Le matériel roulant désigne l'ensemble des véhicules circulant sur le réseau ferroviaire, tels que les locomotives, les automotrices et les wagons. Il constitue un élément fondamental du système ferroviaire, assurant le transport des voyageurs et des marchandises. Son choix dépend des caractéristiques de la ligne et des objectifs d'exploitation. Il contribue directement à la sécurité, au confort et à la performance du transport ferroviaire.

Notre projet étant basé sur un trafic mixte, nous présentons ci-après quelques informations concernant les deux types de trafic : voyageurs et marchandises.

II.6.1. Caractéristiques des trains voyageurs

Les trains de voyageurs sont conçus pour assurer un transport rapide, sûr et confortable des passagers. Ils circulent généralement à des vitesses plus élevées et respectent des horaires réguliers. Leur conception privilégie le confort, la sécurité et l'accessibilité. Les charges à l'essieu restent modérées par rapport aux trains de marchandises.

Généralement, deux grandes lignes ferroviaires traversent le territoire étudié : Annaba–Tébessa et Annaba–Tunis.

⇒ Pour la ligne Annaba–Tébessa, les trains comprennent généralement trois wagons.

⇒ Pour la ligne Annaba–Tunis, les trains comportent environ cinq wagons.

Chaque train de ce type de ligne est équipé d'une ou deux locomotives et d'un groupe moteur adapté au trafic.



Figure II-7 : Locomotive de train des voyageurs Annaba-Tunis (060DJ02)



Figure II-8 : Locomotive de train voyageurs Annaba-Tébessa (060DS13)

II.6.2. Caractéristique des trains marchandise

Pour ce projet, les trains de marchandises sont principalement destinés au transport du phosphate. Ils se distinguent par leur poids élevé et leur grande capacité de chargement, circulant à des vitesses plus faibles et nécessitant des locomotives puissantes. La voie doit être suffisamment robuste pour supporter ces charges, assurant un transport sûr, régulier et efficace du phosphate.



Figure II-9 : Locomotive pour le train des marchandises (060DT02)

 **Phosphate Brute** : wagon minéralier à déchargement central

⇒ **Section OUED-EL-KEBERIT –ANNABA:**

Une locomotive tracte 1550 T

La charge d'un wagon 80 T (60 T de charge net + 20 T tare du wagon)

$1550/80 = 19$ wagon + wagon fourgon de 20 tonnes

La longueur du train fret : (wagon minéralier + wagon fourgon)

✓ Wagon minéralier : $= 19 \times 11,790 = 224,01$ m

✓ Wagon Fourgon : 8,240 m

La longueur du train fret = $224,01 + 8,240 = 232,25$ m

En ajoutant la longueur de la locomotive (engin de 24m) :

On aura :

$$232,25 + 24 = 257 \text{ m}$$

⇒ **Section DJEBEL ONK- OUED-EL-KEBRIT:**

Une locomotive tracte 2740 T

La charge d'un wagon 80 T (60 T de charge net + 20 T tare du wagon)

$2740/80 = 34$ wagon + wagon fourgon de 20 tonnes

La longueur du train fret : (wagon minéralier + wagon fourgon)

✓ Wagon minéralier : $34 \times 11,790 = 400,86$ m

✓ Wagon Fourgon : 8,240 m

La longueur du train fret = $400,86 + 8,240 = 409,1$ m

En ajoutant la longueur de la locomotive (engin de 24m) :

On aura :

$$409,1 + 24 = 433,1 \text{ m}$$

 **Acide phosphorique** : (wagon phosphatier)

⇒ **Section OUED-EL-KEBERIT –ANNABA:**

Une locomotive tracte 1550T

La charge d'un wagon 80 T (63 T de charge net + 17 T tare du wagon)

$1550/80 = 19$ wagon + wagon fourgon de 20 tonnes

La longueur du train fret : (wagon minéralier + wagon fourgon)

✓ Wagon phosphatier = $19 \times 13,490 = 257$ m

✓ Wagon Fourgon : 8,240 m

La longueur du train fret = $257 + 8,240 = 266$

En ajoutant la longueur de la locomotive (engin=24m) :

On aura :

$$266 + 24 = 290 \text{ m}$$

✚ **Acide sulfurique** : (Wagon Acide sulfurique)

⇒ **Section OUED-EL-KEBERIT –ANNABA:**

Une locomotive tracte 2740 T

La charge d'un wagon 80 T (58,8 T de charge net + 21,2 T tare du wagon)

$2740/80 = 34$ wagon + wagon fourgon de 20 tonnes

La longueur du train fret : (wagon minéralier + wagon fourgon)

✓ Wagon Acide sulfurique = $34 * 12,500 = 425\text{m}$

✓ Wagon Fourgon : 8,240 m

La longueur du train fret = $425 + 8,240 = 433.24\text{m}$

En ajoutant la longueur de la locomotive (engin=24m) :

On aura :

$$433.24 + 24 = 457.24 \text{ m}$$

NB : Les caractéristiques du train de marchandises et voyageurs ont été tirées du plan de transport élaboré par la SNTF et SETIRAIL.

II.7. Conclusion

En conclusion, le projet du tronçon PK 00+000 au PK 20+000 vise à augmenter la capacité et la sécurité de la ligne ferroviaire minière Est grâce à la rectification et au dédoublement du tracé ainsi que le nouveau tracé contourne la ville de Souk-Ahras, afin de réduire les nuisances urbaines.

CHAPITRE III
ANALYSE DE SITE ET
CONTRAINTES DU PROJET

III. ANALYSE DE SITE ET CONTRAINTE DU PROJET

III.1. Introduction

L'analyse du site constitue une étape préalable essentielle. Elle permet d'identifier les principales contraintes naturelles et technique susceptibles d'influencer la conception du tracé. Cette étude porte notamment sur les aspects topographiques, hydraulique et sur les intersections avec les infrastructures existantes. Les éléments analysés dans ce chapitre serviront de base à l'élaboration de l'étude géométrique présentée dans le chapitre suivant.

III.2. Analyse topographique

La ville de Souk-Ahras présente un relief vallonné à accidenté, caractérisé par une succession de collines et de vallées étroites. Le tissu urbain s'implante sur un terrain marqué par des dénivellations parfois importantes. Cette configuration topographique impose des contraintes notables pour le tracé ferroviaire, notamment en ce qui concerne la limitation des pentes.

III.3. Contexte hydrologique et hydraulique

La section de projet traverse une zone où la présence de deux oueds, Oued Medjerda et Oued-El-Beriche, à proximité se trouve également le barrage d'Oued Djadra, ces éléments imposent des contraintes pour le tracé ferroviaire. Ainsi que les cours d'eau peuvent connaître des crues saisonnières surtout en période hivernale ce qui impose de prévoir des mesures pour la protection des infrastructures.

III.4. Contrainte foncières et urbaines

Le tracé passe près de la ville de Souk-Ahras et traverse une zone comprenant une mosquée et des zones d'habitation, ce qui impose de protéger ce secteur en limitant l'impact sur l'urbanisation. Il intersecte également une ligne électrique à haute tension ainsi qu'une conduite de gaz, nécessitant la mise en œuvre de mesures de protection et de déviation adaptées. Ces adaptations entraînent des coûts supplémentaires à prendre en compte dans le budget du projet.



Figure III-1 : Le mosquée

III.5. Les infrastructures existantes

Le tracé traverse la RN 20, La CW 19, une ligne ferroviaire existante des pistes agricoles. Ces intersections nécessitent des franchissements adaptés pour garantir la continuité du réseau et limiter l'impact sur les infrastructures existantes.



Figure III-2 : Ligne ferroviaire existante

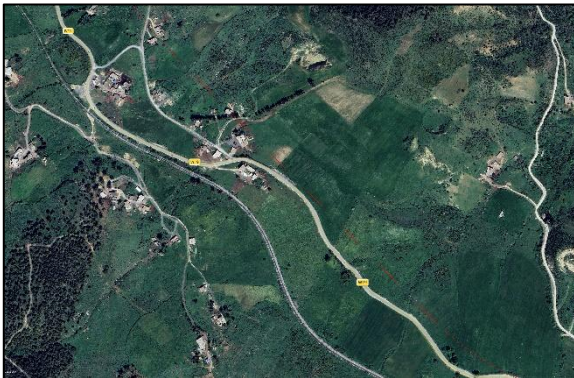


Figure III-3 : CW 19 et ligne ferroviaire existante

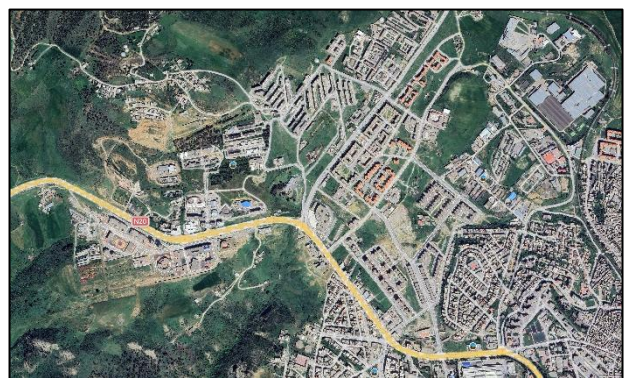


Figure III-4 : RN 20

III.6. Conclusion

L'analyse du site a permis d'identifier les principales contraintes topographiques hydrauliques, urbaines et les infrastructures existantes qui peuvent influencer sur le tracé ferroviaire notamment la nature vallonnée du terrain la présence des oueds et du barrage et les zones urbaines. Ces éléments constituent une base essentielle pour l'élaboration du tracé ferroviaire.

CHAPITRE IV

ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE

IV. ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE

IV.1. Introduction

L'étude géométrique de la voie constitue une étape fondamentale dans la conception des lignes ferroviaires modernes, garantissant à la fois la sécurité et l'efficacité de l'exploitant. Cette approche repose sur l'application des normes et recommandations techniques précises et a pour objectif de définir le tracé optimal en étudiant plusieurs paramètres clés, afin d'assurer une circulation régulière et stable des trains.

IV.2. Tracé en plan

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

- ⇒ V_v : Vitesse des trains de voyageurs.
- ⇒ V_m : Vitesse des trains de marchandises.

Ces vitesses conditionnent la conception du tracé en plan en modulant la géométrie des courbes et des alignements pour assurer les conditions de circulation optimales pour les deux types de trains.

IV.2.1. Critère de limitations des paramètres de tracé en plan

Afin d'assurer à la fois la sécurité des circulations, le confort des voyageurs et la stabilité de l'infrastructure, les paramètres géométriques du tracé ferroviaire sont soumis à des limites bien définies. Chaque paramètre est ainsi encadré par des critères précis, parmi lesquels on distingue :

- ⇒ **Les valeurs limites normales** : elles correspondent aux seuils à ne pas dépasser pour garantir une exploitation sûre des trains, aussi bien aux vitesses maximales qu'aux vitesses minimales autorisées.
- ⇒ **Les valeurs limites exceptionnelles** : plus restrictives que les valeurs normales, elles sont adoptées dans des situations particulières.

IV.2.2. Les conditions et les règles à respecter dans le tracé en plan

Lors de l'élaboration d'un tracé, il est indispensable de respecter un ensemble de prescriptions (conformément aux recommandations de la SNTF et la norme SNCF-IN0272-) afin d'assurer un bon équilibre entre les contraintes techniques et les exigences économiques :

- ⇒ Il faut choisir des rayons de courbure adaptés à la vitesse et au type du train.
- ⇒ Il faut respecter les longueurs minimales des alignements droits et des courbes.
- ⇒ Il faut assurer des transitions progressives entre les parties droites et les courbes.
- ⇒ Il faut adapter le tracé au terrain naturel pour limiter les grands terrassements.
- ⇒ Il faut optimiser le tracé en évitant les oueds, les routes et les zones agricoles pour réduire les coûts.
- ⇒ Il faut éviter les zones à risques géologiques ; si non réaliser une étude du sol pour garantir la sécurité.

IV.2.3. Les éléments du tracé en plan

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

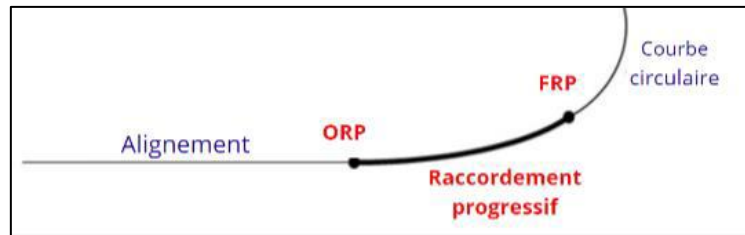


Figure IV-1 : Éléments constitutifs de l'axe en plan

- ✚ **Alignements droits** : Le rayon infini, offrent le confort, la sécurité et la stabilité optimaux.
- ✚ **Arc de cercle** : Relie les alignements droits avec des courbes de rayon précis.
- ✚ **Courbe de raccordement** : Assure une transition progressive entre un alignement droit et une courbe, deux courbes de rayons différents et une courbe et un contre courbe.

L'utilisation des raccordement progressifs selon des conditions précises pour le confort et le comportement dynamique du train.

IV.2.4. Les paramètres géométriques de tracé

Le projet de dédoublement et/ou de rectification du tracé de la ligne ferroviaire minière Est, section centre (BOUCHEGOUF – OUED EL KEBRIT), vise à améliorer la capacité de la ligne. Les paramètres géométriques adoptés sont définis conformément à l'instruction IN0272, en tenant compte d'une vitesse de référence de 120 km/h pour les trains de voyageurs et de 80 km/h pour les trains de marchandises.

IV.2.4.1. Le dévers

Le dévers correspond à la différence de hauteur entre les deux rails à un point donné de la voie. Il est réalisé en surélevant le rail extérieur par rapport au rail intérieur afin de compenser la force centrifuge exercée sur les trains dans les courbes. Dans un alignement droit, le dévers est nul, car aucune force centrifuge ne s'applique

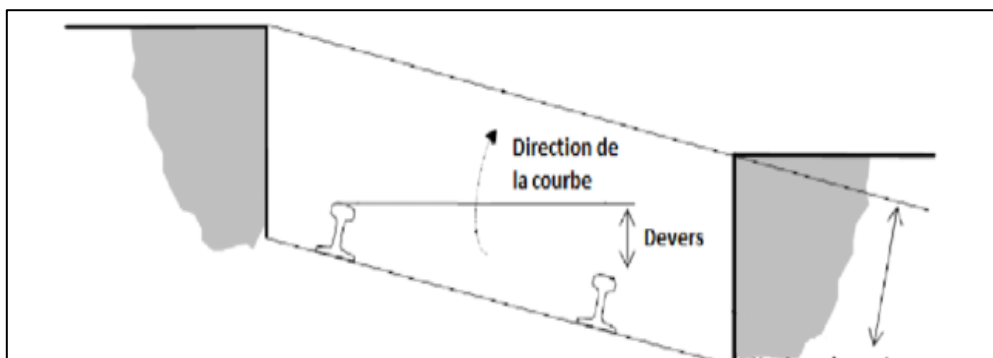


Figure IV-2 : Devers-installé pour une voie en courbe

IV.2.4.1.1. Le dévers théorique

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

Tableau IV-1 : Le dévers théorique

Formule	Paramètre
$d_{th} = \frac{11.8 \times V^2}{R}$	d_{th} : Dévers théorique en (mm) V : La vitesse de la ligne (selon le type du train) en (km/h) R : Rayon de la courbe en (m)

IV.2.4.1.2. Le dévers pratique

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

Tableau IV-2 : Le dévers pratique

Formule	Paramètre
$d_p = \frac{1000 \times C}{R}$	d_p : Dévers pratique en (mm) [doit être : $[0.5d_{th} \leq d_p \leq 0.7d_{th}]$] C : Coefficient de dévers [doit être multiple de 15], la formule de calcul de C est $C = 0.006 \times V_{max}^2$ R : Rayon de la courbe en (m) V_{max} : La vitesse maximale de la ligne en (km/h)

IV.2.4.1.3. Le dévers maximum admissible

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

Tableau IV-3 : Le dévers maximum admissible

D_{max}	Valeur en mm
Valeur limite normal	160
Valeur limite exceptionnelle	180

IV.2.4.1.4. L'insuffisance de dévers

C'est la différence entre le dévers théorique des trains de vitesse maximale et le dévers pratique. Cette différence est une force latérale non compensée qui peut provoquer un déraillement à grande vitesse. La formule de calcul est définie comme suit :

Tableau IV-4 : L'insuffisance de dévers

Formule	Paramètre
$I = d_{th} - d_p \leq I_{max}$	I : L'insuffisance de dévers en (mm) I_{max} : La valeur limite de l'insuffisance de dévers en (mm) d_{th} : Le dévers théorique pour vitesse des trains du voyageurs d_p : Le dévers pratique

Pour les projets avec une vitesse : $V \leq 220 \text{ Km/h}$ selon IN0272, les valeurs limites de l'insuffisance maximal sont fixées :

Tableau IV-5 : Les valeurs limites de l'insuffisance de dévers

I_{max}	Valeur en mm
Valeur limite normal	150
Valeur limite exceptionnelle	160

IV.2.4.1.5. L'excès de dévers

Lorsqu'un train de marchandises circule à faible vitesse dans une courbe, le dévers prévu pour des trains plus rapides, notamment les trains de voyageurs, peut devenir excessif (noté E). Cette situation provoque une accélération latérale non compensée dirigée vers l'intérieur de la courbe, ce qui peut affecter le confort et les conditions de circulation.

Tableau IV-6 : L'excès de dévers

Formule	Paramètre
$E = d_p - d_{th} \leq E_{max}$	E : L'excès de dévers en (mm) E_{max} : La valeur limite de l'excès de dévers en (mm) d_{th} : Le dévers théorique pour vitesse des trains du marchandises d_p : Le dévers pratique

Pour les projets avec une vitesse : $V \leq 220 \text{ Km/h}$ selon IN0272, les valeurs limites de l'excès maximal sont fixées :

Tableau IV-7 : Les valeurs limites de l'excès de dévers

E_{max}	Valeur en mm
Valeur limite normal	110
Valeur limite exceptionnelle	130

IV.2.4.1.6. La variation de dévers dans les courbes de transition en fonction de longueur Δ_d/Δ_l

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

Tableau IV-8 : La variation de dévers dans les courbes de transition en fonction de la longueur

Formule	Paramètre
$\Delta_d/\Delta_l = d_p/L_{rp}$ En (mm/m)	d_p : Le dévers pratique L_{rp} : Longueur de raccordement progressif en (m)

IV.2.4.1.7. La variation de dévers dans les courbes de transition en fonction de temps Δ_d/Δ_t

Tableau IV-9 : La variation de dévers dans les courbes de transition en fonction de temps

Formule	Paramètre
$\Delta_d/\Delta_t = \frac{d_p \times V_{max}}{3.6 \times L_{rp}}$ En (mm/s)	d_p : Le dévers pratique L_{rp} : Longueur de raccordement progressif en (m) V_{max} : La vitesse maximale de la ligne en (km/h)

La limite de la variation de dévers en fonction de la longueur et le temps est donnée dans le tableau suivant (**Tableau IV-10**) :

Tableau IV-10 : Limite de la variation de dévers

Selon SNTF/IN0272			
En fonction de la vitesse maximal des trains			
Valeur normal		Valeur exceptionnelle	
Par rapport la longueur (mm/m)	Par rapport au temps	Par rapport la longueur (mm/m)	Par rapport au temps
$180/V_{max}$	50 mm/s	$216/V_{max}$	60 mm/s

IV.2.4.1.8. Limite de variation de l'insuffisance par rapport au temps Δ_I/Δ_t

La limite de la variation de l'insuffisance en fonctionne de temps est donnée dans le tableau suivant (**Tableau IV-11**) :

Tableau IV-11 : Limite de la variation de l'insuffisance par rapport au temps

Δ_I/Δ_t	Valeur en mm/s
Valeur limite normal	75
Valeur limite exceptionnelle	90

IV.2.4.2. Le rayon minimal

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

Tableau IV-12 : Le rayon minimal

Formule	Paramètre
$R_{\min} = \frac{11.8 \times V_{\max}^2}{I_{\max} + D_{\max}}$	$I_{\max}$: La valeur limite de l'insuffisance de dévers en (mm) $D_{\max}$: Le dévers maximum admissible en (mm) $V_{\max}$: La vitesse maximale de la ligne en (km/h)

IV.2.4.3. Longueur minimale des éléments de tracé

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

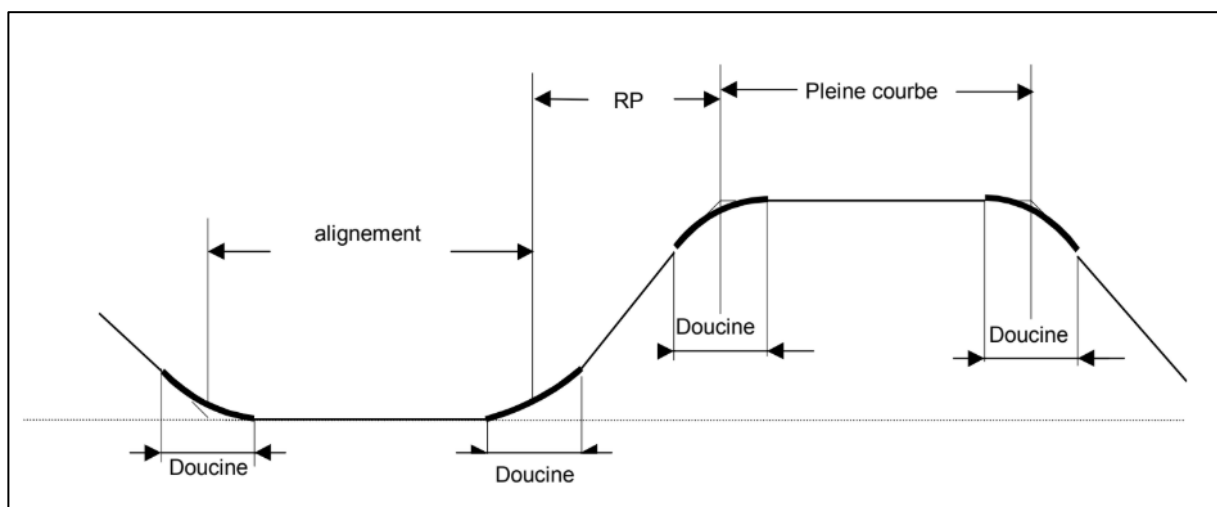


Figure IV-3 : Les éléments du tracé en plan

Tableau IV-13 : Les longueurs minimales des alignements et des pleins courbes

L_{RP} (m)	Courbes avec RP et doucines		Courbes avec RP sans doucines		Courbes sans RP	
Valeur limite normal	V/2	60	V/3	40	V/2	60
Valeur limite exceptionnelle	V/3	40	V/5	24	V/2.5	48

⇒ **Les doucines** : Lors du passage vers un tracé à courbure constante, le changement de pente du rail haut provoque une accélération du roulis du véhicule. Pour l'atténuer, on insère un raccordement circulaire au point de rupture de pente. Ce lissage apparaît sur le diagramme des flèches sous forme d'arrondis appelés doucines.

IV.2.5. Application au projet

Les paramètres géométriques du tracé selon la norme IN0272 et la recommandation SNTF-Chapitre 06 V02 sont définie dans les tableau suivant (**Tableau IV-14**) :

Tableau IV-14 : Tableau récapitulatif sur les paramètres géométriques du tracé en plan

Valeurs	D_{max} (mm)	I_{max} (mm)	E_{max} (mm)	$\frac{\Delta_d}{\Delta_t}$ (mm/m)	$\frac{\Delta_d}{\Delta_t}$ (mm/s)	$\frac{\Delta_l}{\Delta_t}$ (mm/s)	R_{min} (m)
Normal	160	150	110	1.5	50	75	548
Exceptionnelle	180	160	130	1.8	60	90	500

⇒ **Les calculs** : on prend un exemple de calcul pour un rayon de 590 m, pour illustrer les différentes étapes :

Tableau IV-15 : Exemple de calcul pour R=590 m

	Formule	Application numérique	Résultats
Longueur minimale de l'alignement	$V_{max}/2$	$120/2$	60 m
Raccordement progressif est obligatoire	$\Delta C = \frac{1000}{R} > \frac{7000}{V_{max}^2}$	$\Delta C = \frac{1000}{590} > \frac{7000}{V_{max}^2}$	$1.69 > 0.486$ RP obligatoire
Dévers théorique pour les trains de voyageurs	$d_{th (voyageurs)} = \frac{11.8 \times V^2}{R}$	$\frac{11.8 \times 120^2}{590}$	228 mm
Dévers théorique pour les trains de marchandises	$d_{th (marchandises)} = \frac{11.8 \times V^2}{R}$	$\frac{11.8 \times 80^2}{590}$	128 mm

Coefficient de dévers	$C = 0.006 \times V_{max}^2$	$C = 0.006 \times 120^2$	86.4
C adopté	90		
Vérification du C	$0.5 < \frac{C}{0.0118 \times V_{max}^2} < 0.7$	$\frac{90}{0.0118 \times 120^2}$	$0.5 < 0.53 < 0.7$ Vérifié
Dévers pratique	$d_p = \frac{1000 \times C}{R}$	$\frac{1000 \times 90}{590}$	152.54 mm
Dévers pratique adopté	155 mm		
Insuffisance de dévers	$I = d_{th(voy)} - d_p < I_{max}$	$I = 228 - 155$	$73 \text{ mm} < I_{max} = 150 \text{ mm}$ vérifié
Excès de dévers	$E = d_p - d_{th(march)} < E_{max}$	$E = 155 - 128$	$27 \text{ mm} < E_{max} = 110 \text{ mm}$ vérifié
Longueur de la clothoïde	$L_{rp} = \frac{d_p}{\Delta_d / \Delta_l}$	$L_{rp} = \frac{155}{1.5}$	$L_{rp} = 103.33 \text{ m}$
L_{rp} Adopté	110 m		
Paramètre de clothoïde	$A = \sqrt{L_{rp} \times R}$	$A = \sqrt{L_{rp} \times R}$	254.75
Variation de dévers par rapport aux longueurs	$\Delta_d / \Delta_l = \frac{d_p}{L_{rp}}$	$\Delta_d / \Delta_l = \frac{155}{110}$	$1.41 \text{ mm/m} < 1.5 \text{ mm/m}$ Vérifié
Variation de dévers par rapport aux temps	$\Delta_d / \Delta_t = \frac{d_p \times V_{max}}{L_{rp} \times 3.6}$	$\Delta_d / \Delta_t = \frac{155 \times 120}{110 \times 3.6}$	$46.97 \text{ mm/s} < 50 \text{ mm/s}$ Vérifié
Variation de l'insuffisance par rapport aux temps	$\Delta_l / \Delta_t = \frac{I \times V_{max}}{L_{rp} \times 3.6}$	$\Delta_l / \Delta_t = \frac{73 \times 120}{110 \times 3.6}$	$22.12 \text{ mm/s} < 75 \text{ mm/s}$ Vérifié

➤ **NB : justification d'utilisation de R=590 m :**

Un rayon de 590 m a été adopté, bien qu'il soit supérieur au rayon minimal de 548 m, afin d'améliorer la sécurité, le confort de circulation ainsi que les conditions d'exploitation à la vitesse de projet. Le terrain vallonné impose d'importantes contraintes topographiques limitant les possibilités d'ajustement du tracé. Par ailleurs, la proximité des habitations existantes ne permet pas d'apporter des modifications significatives à l'implantation de la voie. Ce choix représente ainsi un compromis entre les exigences normatives, les contraintes du site et le maintien de la vitesse de circulation prévue.

Nous avons utilisé 16 rayons : un rayon de 1500 m, deux rayons de 950 m, un rayon de 800 m, un rayon de 750 m et onze rayons de 590 m.

Tableau IV-16 : Tableau récapitulatif des éléments de tracé en plan

	Rayons (m)					
	590	600	750	800	950	1500
$d_{th(voyageurs)}$ (mm)	288	283.2	226.56	212.4	178.86	113.28
$d_{th(marchandises)}$ (mm)	128	125.86	100.69	94.4	79.49	50.35
C	86.4					
C adopté	90					
Vérification de C	$0.5 < 0.53 < 0.7 \Rightarrow$ Vérifié					
d_p (mm)	152.54	150	120	112.5	94.74	60
d_p adopté (mm)	155	155	120	115	95	60
Vérification de d_p adopté	$d_p \text{ adopté (mm)} \leq D_{max} = 160 \text{ mm} \Rightarrow$ Vérifié					
I (mm)	133	128.2	106.56	97.4	83.86	53.28
Vérification du I	$I \text{ adopté (mm)} \leq I_{max} = 150 \text{ mm} \Rightarrow$ Vérifié					
E (mm)	27	29.13	19.31	20.6	15.51	9.65
Vérification du E	$E \text{ adopté (mm)} \leq E_{max} = 110 \text{ mm} \Rightarrow$ Vérifié					
L_{rp} (m)	103.33	103.33	80	76.67	63.33	40
$L_{rp(retenue)}$ (m)	110	110	90	80	70	60
Paramètre de clothoïde	254.75	256.90	244.95	252.98	257.88	
Δ_d/Δ_l (mm/m)	1.41	1.41	1.33	1.44	1.36	1
Vérification du Δ_d/Δ_l	$\Delta_d/\Delta_l \leq \Delta_d/\Delta_{l_{max}} = 1.5 \text{ mm/m} \Rightarrow$ Vérifié					
Δ_d/Δ_t (mm/s)	46.97	46.97	50	47.92	45.24	40

Vérification du Δ_d/Δ_t	$\Delta_d/\Delta_t \leq \Delta_d/\Delta_{t_{max}} = 50 \text{ mm/s} \Rightarrow \text{Vérifié}$					
Δ_I/Δ_t (mm/s)	40.30	38.85	44.40	40.58	39.93	35.52
Vérification du Δ_I/Δ_t	$\Delta_d/\Delta_t \leq \Delta_I/\Delta_{t_{max}} = 75 \text{ mm/s} \Rightarrow \text{Vérifié}$					

NB : Le tracé a été réalisé à l'aide du logiciel COVADIS 16 et les éléments du tracé en plan sont annexé au présent document (**ANNEXE A**)



Figure IV-4: Les contraintes du PK 0+000 au PK 20+00

IV.3. Profil en long

Le profil en long représente l'une des composantes essentielles de la conception et de la planification des infrastructures linéaires telles que les voies ferrées et les canaux. Ce diagramme graphique offre une vue détaillée des variations d'altitude le long de l'axe du projet fournissant des informations importantes sur les caractéristiques topographiques du terrain.

Dans le contexte des projets ferroviaires, le profil en long joue un rôle fondamental guidant les ingénieurs dans la conception géométrique du tracé, la gestion des contraintes hydrauliques et géotechniques ainsi que l'anticipation des risques naturels.

IV.3.1. Les éléments de profil en long

IV.3.1.1. Les alignements droits

Le profil longitudinal comporte des pentes marquées, caractérisées par la tangente de l'angle formé entre la ligne du projet et l'horizontale. Ces inclinaisons se traduisent par des rampes en montée et des pentes en descente, assurant à la fois la sécurité des circulations et de bonnes conditions d'exploitation. Selon le référentiel **SNCF** (IN0272), deux conditions à respecter pour la conception du profil en long :

IV.3.1.1.1. 1^{ère} condition : La déclivité en fonction de sa longueur

Tableau IV-17 : Les déclivités maximales en fonction de la longueur

L(m)	Pente absolue
Pour une longueur de tronçon quelconque	< 20 ‰
$1000 < L \leq 2000$	<25 ‰
$400 < L \leq 1000$	<30 ‰
$L \leq 400$	<35 ‰
La gare	0‰

IV.3.1.1.2. 2^{ème} condition : La pente moyenne pour une zone

Tableau IV-18 : La pente moyenne pour une zone

Longueur (m)	Pente moyenne
Zone de longueur quelconque	< 20 ‰
$L \leq 2000$	< 25 ‰
$L \leq 1000$	< 30 ‰
$L \leq 400$	< 35 ‰

Le placement des droites par rapport au sol naturel est dicté par plusieurs considérations afin d'assurer une conception optimale du profil en long, telles que

- ⇒ Respecter la valeur maximale des pentes.
- ⇒ Eviter les points bas au niveau des zones de déblais et assurer l'évacuation des eaux pluviales.
- ⇒ Observer les mesures géométriques recommandées par les règlements en vigueur.

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

Tableau IV-19 : Longueur minimale des déclivités (SNTF)

Paramètre	Valeur limite normal		Valeur limite exceptionnelle	
Longueur minimale des déclivités	V/2	60 m	V/2.5	48 m

IV.3.1.2. Les raccordements circulaires

Dans le profil en long des voies ferrées, les changements de pente sont réalisés par des courbes verticales à rayons spécifiques afin d'assurer une transition progressive. Ces courbes permettent de réduire l'accélération verticale brusque ressentie par le train lors d'un changement de pente. Elles jouent ainsi un rôle essentiel dans la protection de l'infrastructure et l'amélioration du confort des passagers.

Cette accélération est donnée par la formule suivante : $A_v = \frac{V^2}{3.6^2 \times R_v}$

Pour garantir le confort des passagers à des vitesses inférieures à 220 km/h, l'accélération verticale doit rester en dessous de **0.22m/s²**, avec une tolérance exceptionnelle jusqu'à **0.31m/s²**.

En remplaçant les valeurs de A_v dans la formule : $R_v = \frac{V^2}{3.6^2 \times A_v}$; on trouve :

Tableau IV-20 : Valeurs de Rayon vertical minimal (SNTF)

Paramètre	Valeur limite normal		Valeur limite exceptionnelle	
Valeur minimale des rayons verticaux	$0.35 V^2$	5040 m	$0.25 V^2$	3600 m

NB : Le profil en long a été réalisé à l'aide du logiciel COVADIS 16 et les éléments du tracé en plan sont annexé au présent document (**ANNEXE A**)

IV.3.2. Coordination entre profil en long et tracé en plan

Afin d'assurer une coordination optimale entre le profil en long et le tracé en plan. Il est nécessaire de respecter les exigences suivantes :

- ⇒ Éviter de placer une courbe dans le profil en long juste après une courbe dans le tracé en plan. Pour garantir le confort de roulement et éviter toute rupture brusque de pente, la longueur du raccordement, notée L, avec $L \geq 60 m$

Le tableau suivant montre les éléments de profil en long

Tableau IV-21 : Tableau récapitulatif des éléments de profil en long

Nom	Pente/Rayon	Longueur (m)
Pente 1	0.000%	1652.003
Cercle 1	-6000.00	95.988
Pente 2	-1.600%	1877.785
Cercle 2	-25000.00	98.361
Pente 3	-1.994%	7330.642
Cercle 3	7000.00	260.575
Pente 4	1.730%	3057.218
Cercle 4	-10000.00	156.732
Pente 5	0.162%	1864.804
Cercle 5	9000.00	114.046
Pente 6	1.431%	3492.54

IV.4. Conclusion

Une étude géométrique précise est fondamentale pour garantir la sécurité, le confort et la performance d'une voie ferrée. Elle permet d'optimiser le tracé, d'assurer la stabilité de l'infrastructure, de maîtriser les coûts et de respecter les normes réglementaires, contribuant ainsi à la durabilité du projet.

CHAPITRE V
ÉTUDE HYDROLOGIQUE ET
HYDRAULIQUE

V. ÉTUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

V.1. Introduction

Dans les projets ferroviaires, l'hydrologie et l'hydraulique constituent des disciplines fondamentales pour la compréhension et la gestion des ressources en eau. L'analyse des précipitations, des débits des cours d'eau et des risques d'inondation permet d'identifier les contraintes et les enjeux liés à la planification, à la conception et à la réalisation des infrastructures ferroviaires.

En associant bases théoriques et méthodes pratiques, ces études offrent un cadre technique essentiel pour anticiper les effets des phénomènes hydrologiques et limiter leurs impacts sur les ouvrages, garantissant ainsi la sécurité, la stabilité et la durabilité des projets.

La présente section porte sur l'étude hydrologique et hydraulique du projet de dédoublement, de modernisation et de rectification du tracé de la ligne minière Est, notamment la section centre (BOUCHEGOUF-OUED EL KEBRIT) sur le tronçon du PK00+000 au PK20+000.

V.2. Étude hydrologique

L'hydrologie est une discipline scientifique qui se consacre à l'étude complète de l'évolution des eaux sur la surface de la terre et dans le sous-sol. Elle examine les propriétés physiques, mécaniques et techniques de ces eaux, ainsi que leur origine, leur mouvement et leur répartition sur notre planète. Elle explore, aussi, les interactions des eaux avec l'environnement et leur impact sur les activités humaines.

Une étude hydrologique vise à examiner de manière détaillée le fonctionnement du cycle de l'eau dans une zone donnée. Elle repose sur la collecte et l'analyse de données relatives aux précipitations, à l'évaporation et à la transpiration des végétaux, à l'infiltration, au ruissellement ainsi qu'aux débits des cours d'eau.

Son objectif principal est de déterminer la disponibilité et la répartition des ressources en eau dans la région, afin d'estimer les débits de crue, d'évaluer les risques d'inondation et de dimensionner correctement les ouvrages hydrauliques.

V.2.1. Présentation générale

Du point de vue hydrologique, le tracé de ligne ferroviaire Souk-Ahras – Oued-El-Kebrit objet de la présente étude, fait partie du bassin versant n°12 de la Medjerda, qui est subdivisé en plusieurs sous-bassins, dont principalement l'Oued Medjerda amont et ses affluents, l'Oued Charef et l'Oued Mellègue, ainsi que quelques petits sous-bassins secondaires. » (Selon la codification de l'ANRH).

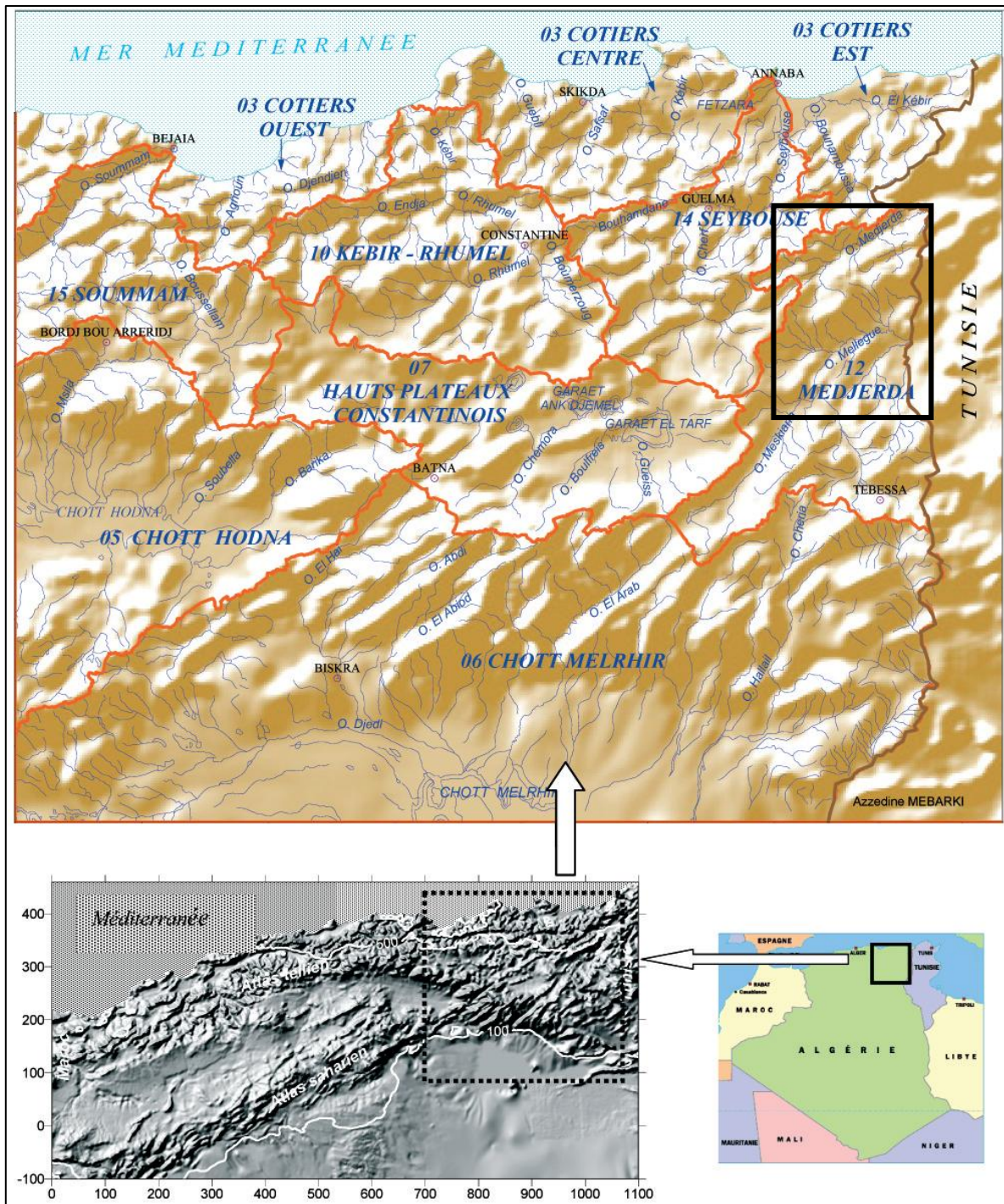


Figure V-1 : Bassin hydrographique N°12 et position de la zone d'étude

V.2.2. Les caractéristiques climatiques et pluviométriques

V.2.2.1. Le climat

La wilaya de Souk-Ahras présente un climat principalement semi-aride à subhumide, avec des étés chauds et secs, des hivers frais à froids la nuit, et des précipitations modérées concentrées principalement en hiver.

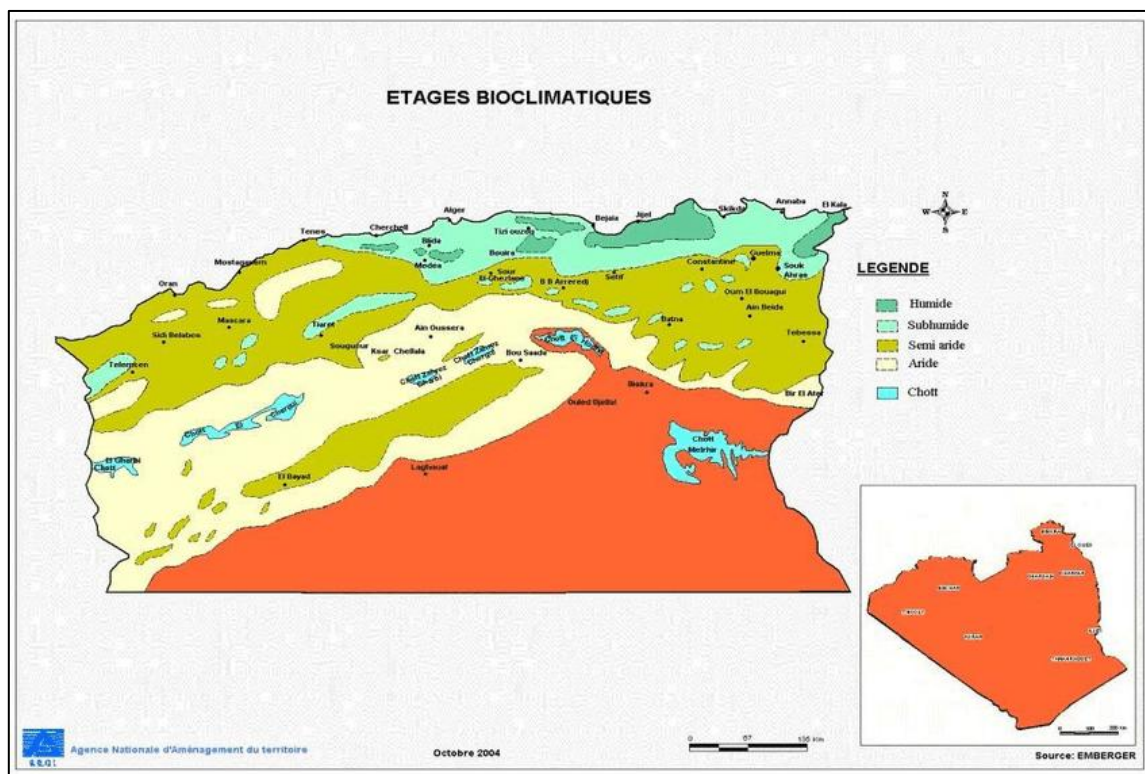


Figure V-2 : Classification du climat en Algérie

V.2.2.2. La température

La région de l'étude est caractérisée par un climat méditerranéen avec un été chaud et un hiver froid avec une température moyenne annuelle de l'ordre de 16.01°C au niveau de la station de SOUK AHRAS et de 15.8°C au niveau de la station de Tébessa.

Tableau V-1 : Moyenne annuelles et mensuelles des températures à la station de SOUK AHRAS et de Tébessa (source ONM).

Station	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moyenne annuelle
SOUK AHRAS	22.3	18.1	12.6	8.9	7.28	8.1	10.5	12.7	17.5	21.8	25.6	26.3	16.01
Tébessa	22.6	16.5	11.3	7.3	6.0	7.4	10.3	14	18.2	23.4	26.7	26.2	15.8

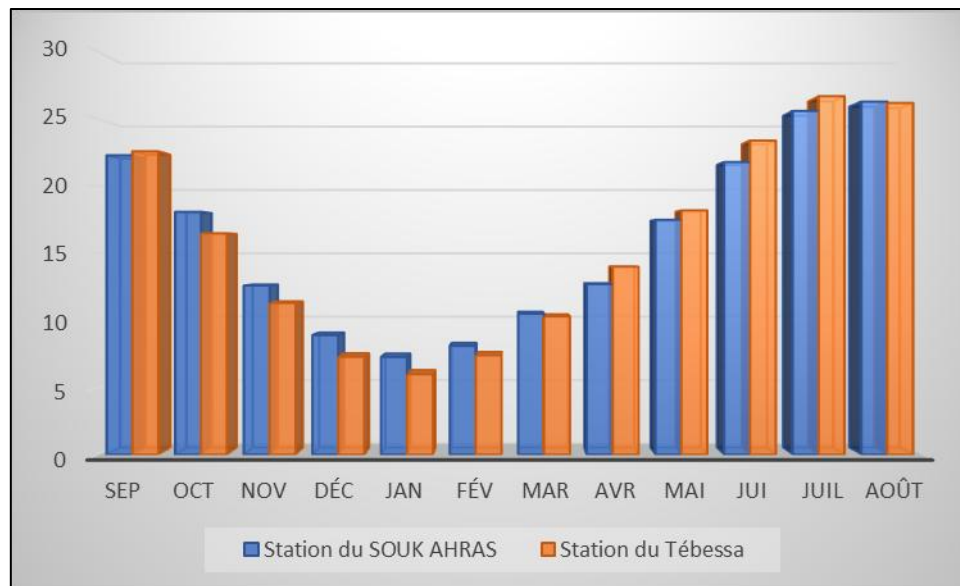


Figure V-3 : Variation des températures moyennes mensuelles

Comme le montre le tableau et l'histogramme, la température varie entre 7.28 °C. enregistrée en janvier et 26.3 °C enregistrée en août avec une température moyenne annuelle d'environ 16.01 °C selon la station du Souk-Ahras, la température varie entre 6.0 °C. enregistrée en janvier et 26.7 °C enregistrée en juillet avec une température moyenne annuelle d'environ 15.8 °C selon la station du Tébessa.

V.2.2.3. Les précipitations

L'étude des précipitations revêt une importance majeure en hydrogéologie, car elle permet d'estimer la quantité d'eau tombée sur l'ensemble du bassin versant et d'évaluer son influence sur l'alimentation en eau, ainsi que son rôle dans l'évolution du comportement hydrodynamique de la nappe. Les données relatives à la région étudiée ont été obtenues auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et de l'Office National de la Météorologie (ONM).

On va travailler sur la station de Souk-Ahras pour notre tronçon du PK 00+000 au PK 20+000 qui fait partie de la wilaya de Souk-Ahras.

V.2.2.3.1. La précipitation journalière

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

Le tableau ci-après (**Tableau V-2**) présente les précipitations journalières maximales estimées pour différentes périodes de retour, obtenues par ajustement des données à la loi de Gumbel.

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

Période de retour (ans)	10	20	50	100
Fréquence	0.9	0.95	0.98	0.99
U (Gumbel)	2.25	2.97	3.90	4.60
Pluie journalière maximal (mm)	80	91.2	105.7	116.6

V.2.2.3.2. La précipitation annuelle

L'ajustement à une loi normale des pluies annuelles des stations de nous montre que les distributions statistiques dans notre région présentent un caractère symétrique. Dans le tableau suivant (**Tableau V-3**) nous présentons les pluies annuelles pour différentes fréquences dans la station de Souk-Ahras.

Tableau V-3 : Pluies annuelles selon les fréquences choisies.

Période de retour (ans)	10	20	50	100
Fréquence	0.9	0.95	0.98	0.99
Pluies annuelles (mm)	922.6	987.3	1060.2	1108.8

V.2.2.3.3. Pluies de courtes durées

La détermination de la loi Intensité–Durée–Fréquence (IDF) repose sur l'exploitation des enregistrements pluviographiques. À partir du dépouillement des pluies à intensité constante, les hauteurs de précipitations ont été calculées pour différents pas de temps (1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h et 24 h). Pour chaque durée, la valeur maximale enregistrée lors de chaque averse a été retenue, ce qui a permis d'établir une série de données pour chaque intervalle de temps sur l'ensemble de la période étudiée. La relation Intensité–Durée–Fréquence recherchée s'exprime sous la forme suivante :

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

Avec :

I : Intensité de pluie [mm/h].

T : Période de retour [ans].

t : Temps de concentration du bassin versant [h].

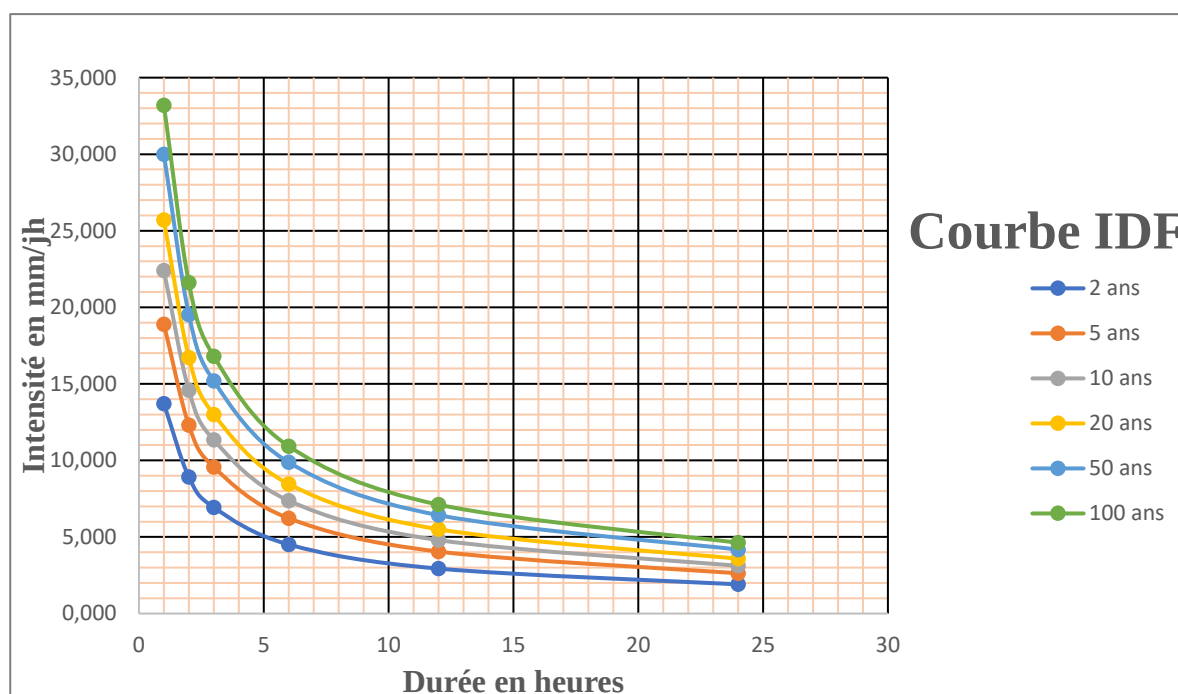
a et **b** : Paramètres de Montana.

Tableau V-4 : Valeur du paramètre de Montana 'a' pour les différentes périodes de retour selon la station de Souk-Ahras

T (ans)		2	5	10	20	50	100
a (T)	Souk-Ahras	13.7	18.9	22.4	25.7	30	33.2

Tableau V-5: Valeur du paramètre de Montana 'b' selon la station de Souk-Ahras

Station	Souk-Ahras
b	0.62

**Figure V-4 : Courbe intensité-durée-Fréquence (IDF).**

V.2.2.4. Humidité (les zones bioclimatiques)

Dans l'Est algérien, le climat à dominante méditerranéenne se caractérise par l'alternance d'une saison froide et humide et d'une saison chaude et sèche, cette dernière s'étendant progressivement vers le Sud jusqu'à couvrir toute l'année dans les zones arides. L'étude conjointe des précipitations et des températures, appelée combinaison pluviothermique, permet de déterminer les domaines bioclimatiques propres à chaque région.

À l'aide du climagramme d'Emberger, qui associe le quotient pluviothermique (Q) en ordonnée et la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (m) en abscisse, on distingue plusieurs étages bioclimatiques méditerranéens :

- ⇒ **Humide** : $P > 900$ mm, forte humidité atmosphérique.
- ⇒ **Subhumide** : $P \approx 600$ mm.
- ⇒ **Semi-aride** : $300-350 \text{ mm} < P < 550-600$ mm, avec déficit hydrique marqué.
- ⇒ **Subaride** : $P < 350$ mm, nombre de mois secs supérieur aux mois humides.
- ⇒ **Aride** : $P < 150$ mm, 12 mois biologiquement secs.

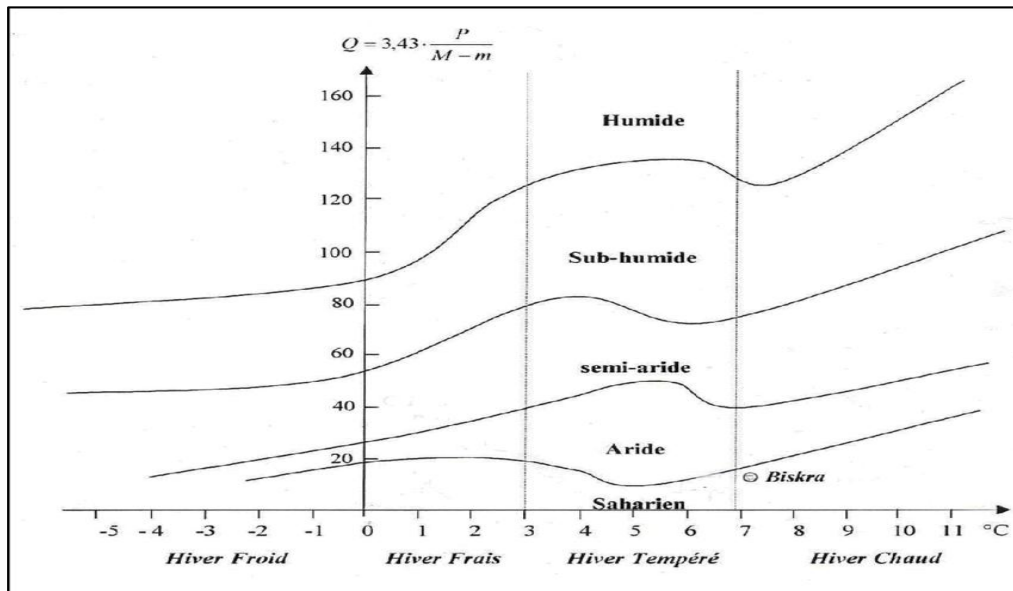


Figure V-5 : Climagramme d'EMBERGER 1990-2004

La carte au 1/ 1000 000 de Côte. M. (1998), réalisée suivant ce principe est corroborée à la connaissance des milieux naturels et particulièrement, des groupements végétaux, est illustrative : brutalité des contrastes et disposition en bandes zonales longitudinales rappellent celles du relief et des précipitations.

D'après cette carte la zone d'étude est caractérisée par un climat subhumide à semi-aride (entre Souk-Ahras et Oued El Kebrit).

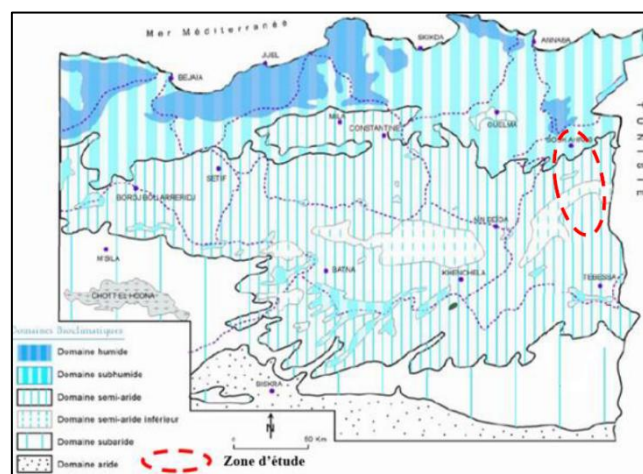


Figure V-6 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (Établie d'après Côte M., 1998).

V.2.3. Les caractéristiques morphologiques des bassins versants

Du point de vue hydrologique, le tracé de ligne ferroviaire ligne minière, tronçon Souk-Ahras-Oued-El-Kebrit traverse principalement le sous bassins versants d'oued Medjerdah.

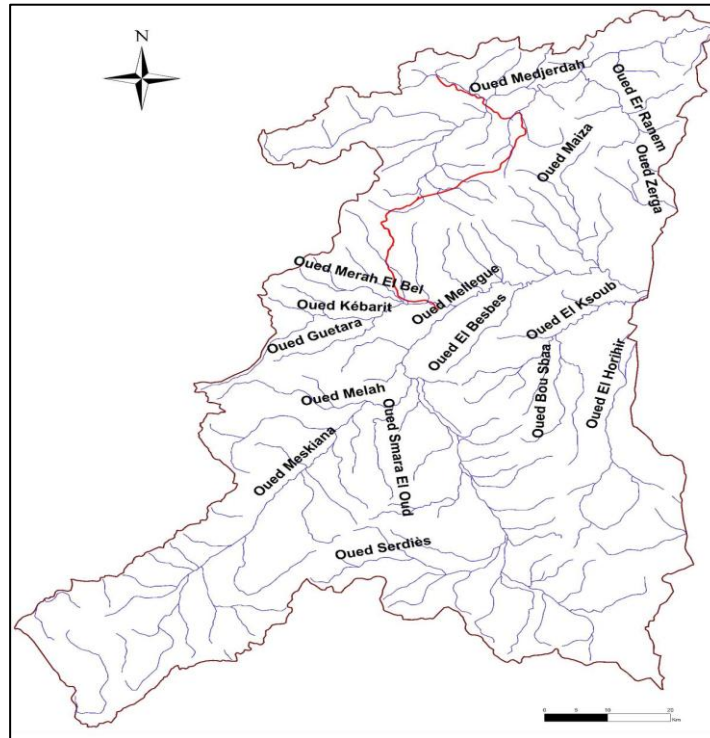


Figure V-7 : Carte des sous bassins versants et leur réseau hydrographique traversés par la ligne Souk-Ahras-Oued-El-Kebrit

V.2.3.1. Délimitation des bassins versants

Le bassin versant constitue une unité hydrologique naturelle qui collecte les précipitations et les transforme en écoulements dirigés vers un exutoire, situé au point de convergence des eaux. Cette transformation dépend à la fois des conditions climatiques et des caractéristiques physiques propres au bassin versant.

L'analyse des caractéristiques d'un bassin versant a pour objectif de déterminer et d'évaluer les paramètres explicatifs nécessaires à l'estimation des débits de crue. Les paramètres physiques, qui peuvent être calculés avec une précision satisfaisante, jouent un rôle fondamental dans cette évaluation. Les paramètres sont les suivants :

- ⇒ S (km^2) : Surface du bassin versant.
- ⇒ P (km) : Périmètre du bassin versant.
- ⇒ L (km) : Longueur du plus long Talweg.
- ⇒ $H_{\max}$, $H_{\min}$, H_{moy} (m) : L'altitude maximale, minimale et moyenne.
- ⇒ Δh (m) : La différence entre l'altitude maximale et minimale du bassin ($H_{\max} - H_{\min}$)
- ⇒ I (m/m) : Pente du talweg principal ($I = \frac{\Delta h}{L}$).
- ⇒ K_c : Indice du Gravelius ($K_c = 0.28 \times P/\sqrt{S}$).
- ⇒ T_c : Le temps de concentration

Pour le temps de concentration (T_c), la formule de calcul a été choisie en fonction de la superficie du bassin versant :

Superficie inférieure à 5 km²

Le temps de concentration est calculé par la formule **des petits bassins** < 5km²

$$T_c = 0.127 \times \sqrt{\frac{A}{I}}$$

T_c [h] : temps de concentration.

A [Km²] : superficie du bassin versant.

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

Superficie comprise entre 5 et 25 Km²

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

$$T_c = 0.108 \times \frac{\sqrt[3]{A \times L}}{\sqrt{I}}$$

T_c [h] : temps de concentration.

A [Km²] : superficie du bassin versant.

L [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 par la formule de **GIANDOTTI** :

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

T_c [h] : temps de concentration.

A [Km²] : superficie du bassin versant.

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

H_{moy} [m] : L'altitude moyenne.

H_{min} [m] : Altitude minimale.

NB : On utilise pour la délimitation des bassins versants logiciel du GLOBAL MAPPER 22, Google Earth Pro, INFRAWORKS 2023 et la carte d'état-major avec AutoCAD.

Les caractéristiques des bassins versants sont mentionnées sur le tableau suivant (Tableau V-6)

Tableau V-6 : Les caractéristiques des bassins versants

N° BV	PK	K _c	A	P	H _{max}	H _{min}	Δh	H _{moy}	L	I	T _c
			Km ²	Km	m	m	m	m	Km	m/m	h
1	00+560	1.2	0.51	3.13	976	736	240	856	0.976	0.246	0.18
2	1+045	1.2	0.77	3.66	1045	738	307	891.5	1.196	0.257	0.22
3	1+750	1.3	0.44	2.99	990	734	256	862	0.897	0.285	0.16
4	1+930	1.2	0.61	3.46	932	744	188	838	0.723	0.260	0.19
5	2+910	1.3	0.3	2.48	788	708	80	748	0.662	0.121	0.20
6	4+730	1.1	0.63	3.1	792	662	130	727	1.949	0.067	0.39
7	5+160	1.1	0.3	2.2	805	691	114	748	0.616	0.185	0.16
8	5+835	1.2	0.15	1.67	791	658	133	724.5	0.523	0.254	0.10
9	5+970	1.2	0.14	1.63	750	663	87	706.5	0.544	0.160	0.12
10	6+145	1.0	0.38	2.3	629	564	65	596.5	0.882	0.074	0.29
11	8+975	1.2	0.06	1.07	628	561	67	594.5	0.331	0.202	0.07
12	9+680	1.2	0.57	3.15	636	530	106	583	0.345	0.307	0.17
13	9+930	1.1	3.44	7.11	626	519	107	572.5	0.754	0.142	0.63
14	10+830 Oued Medjerdah	1.7	582.76	143.707	1320	512	808	916	60.28	0.013	11.63
15	11+913	1.1	3.4	7.06	840	514	326	677	2.477	0.132	0.65
16	13+055	1.3	2.16	7.03	822	568	254	695	1.79	0.142	0.50
17	13+580	1.9	0.03	1.17	750	720	30	735	0.152	0.197	0.05
18	13+875	1.3	0.1	1.45	750	683	67	716.5	0.359	0.187	0.09

19	15+690		1.3	6.68	12.12	992	576	416	784	3.142	0.132	0.82
20	15+990		1.1	0.65	3.16	747	589	158	668	1.095	0.144	0.27
21	16+425		1.4	0.13	1.83	705	658	47	681.5	0.288	0.163	0.11
22	Oued El Beriche	18+230	1.2	66.8	35.08	1065	620	445	842.5	36.88	0.012	7.38
		18+530										
		19+420										

Dans la figure ci-dessous un exemple pour la délimitation d'un **BV N°16** par logiciel INFRAWORKS 2023



Figure V-8 : Délimitation BV N°16 par logiciel INFRAWORKS 2023

Remarque

Les détails de la délimitation sont mentionnés sur **ANNEXE B**

V.2.4. Calcul des débits maximaux (Les crues)

La détermination du débit maximal d'un cours d'eau présente une importance majeure, compte tenu des conséquences souvent destructrices associées aux crues.

Pour estimer les débits de pointe des bassins versants, notamment aux points de franchissement les plus significatifs, on recourt à des formules empiriques. Celles-ci intègrent à la fois les données pluviométriques et les caractéristiques physiques propres à chaque bassin versant afin de fournir une évaluation représentative des écoulements extrêmes.

Les formules utilisées pour détermination des débits sont suivantes :

Tableau V-7 : Les formules utilisées dans le calcul du débit

Surface du bassin versant (km ²)	10	50	2000
Formule utilisée	Rationnelle	Transition	Crupedix

V.2.4.1. Formule rationnelle

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

Q_{max} [m³/s] : Débit de crue de fréquence.

C_r : Coefficient de ruissellement.

I [mm/h] : Intensité de pluie de fréquence déterminée pour une durée égale au temps de concentration.

A [km²] : Surface du bassin versant.

Pour la détermination du coefficient du ruissellement, on a opté pour la méthode de KENESSEY :

$$C_r = C_1 + C_2 + C_3$$

➤ **C₁** : Dépend de la pente du cours d'eau principal.

Tableau V-8 : Valeur de C₁

La pente du cours d'eau	Coefficient C ₁
Pente < 3.5 %	0.01-0.05
3.5 % <Pente < 11 %	0.06-0.1
11 % <Pente < 35 %	0.12-0.2
Pente> 35 %	0.22-0.3

Les valeurs des pentes ont été représentées dans le tableau des caractéristiques morphométriques des bassins versants des écoulements superficiels traversés par le tracé du projet de la Ligne Minière, pour le tronçon Souk-Ahras – Oued-El-Kebrit (du PK00+000 au PK20+000) (**Tableau V-6**).

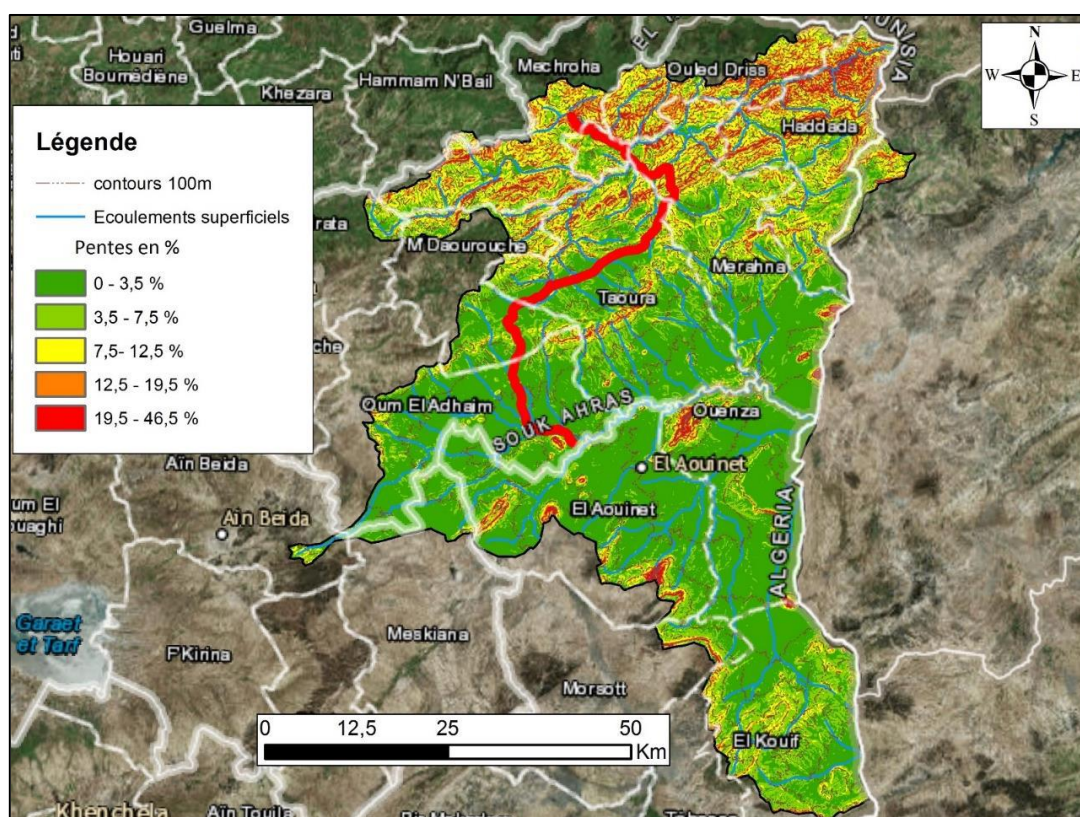


Figure V-9 : Carte des pentes de la zone traversée par le tracé de la ligne minière, Section Centre, tronçon SOUK-AHRAS – Oued Kébrit.

➤ C_2 : Dépend de la perméabilité du terrain

Tableau V-9 : Valeur de C_2

La perméabilité du terrain	Coefficient C_2
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

Ce coefficient est estimé à 0.3 pour un terrain imperméable, 0.1 pour un bassin perméable et 0.2 pour un terrain à perméabilité moyenne.

Les valeurs de la perméabilité ont été estimées en utilisant la carte géologique de Souk-Ahras. Lithologiquement, les terrains traversés sont très variables et se caractérisent par tous les types de perméabilités. Cependant, les terrains rocheux tels que les calcaires, les marnes, les argiles se caractérisent par une mauvaise perméabilité. Généralement, ces terrains constituent

les versants et les massifs montagneux. Les terrains meubles tels que les alluvions se caractérisent par une bonne à pas assez bonne perméabilité.

Pour notre tracé on trouve que notre tracé franchi d'un grand part des zones trias et des terrains marneuses $\Rightarrow$ des terrains imperméables

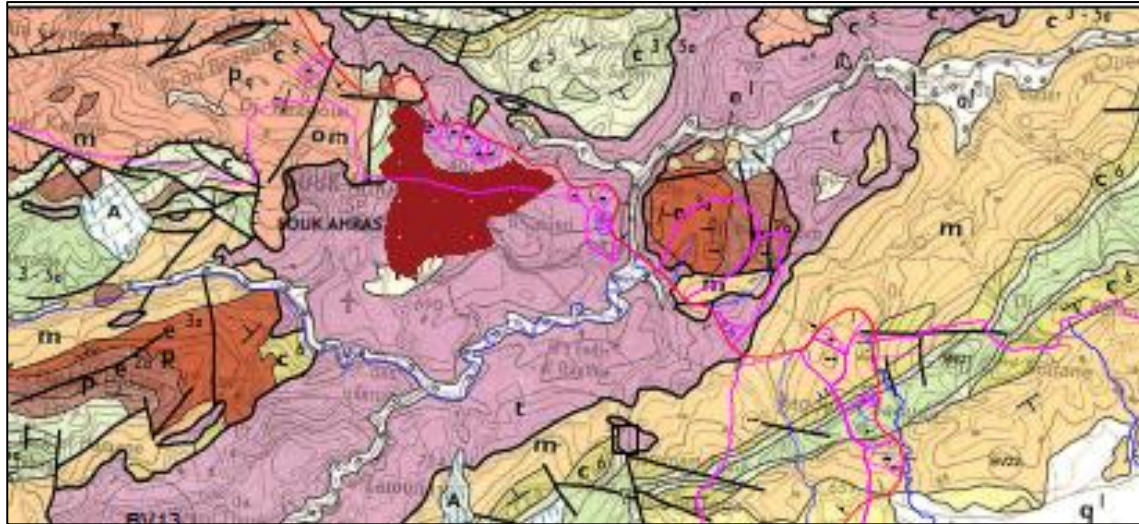


Figure V-10 : Carte géologique de la zone du tracé

➤ C_3 : Dépend de la couverture végétale du bassin versant.

Tableau V-10 : Valeur de C_3

La couverture végétale du bassin versant	Coefficient C_3
Les terrains rocheux	0.22-0.3
Les prèes	0.17-0.25
Les champs labours	0.07-0.15
Les forêts et les sol sableux	0.03-0.05

Lors de la visite sur site effectué le 12 Avril 2026, et d'après la carte d'affectation des terres sur la région du Souk-Ahras, il a été observé que la zone d'étude est principalement caractérisée par une agriculture semi-intensive en sec (plaine et bas piémont) $\Rightarrow$ des champs labours.

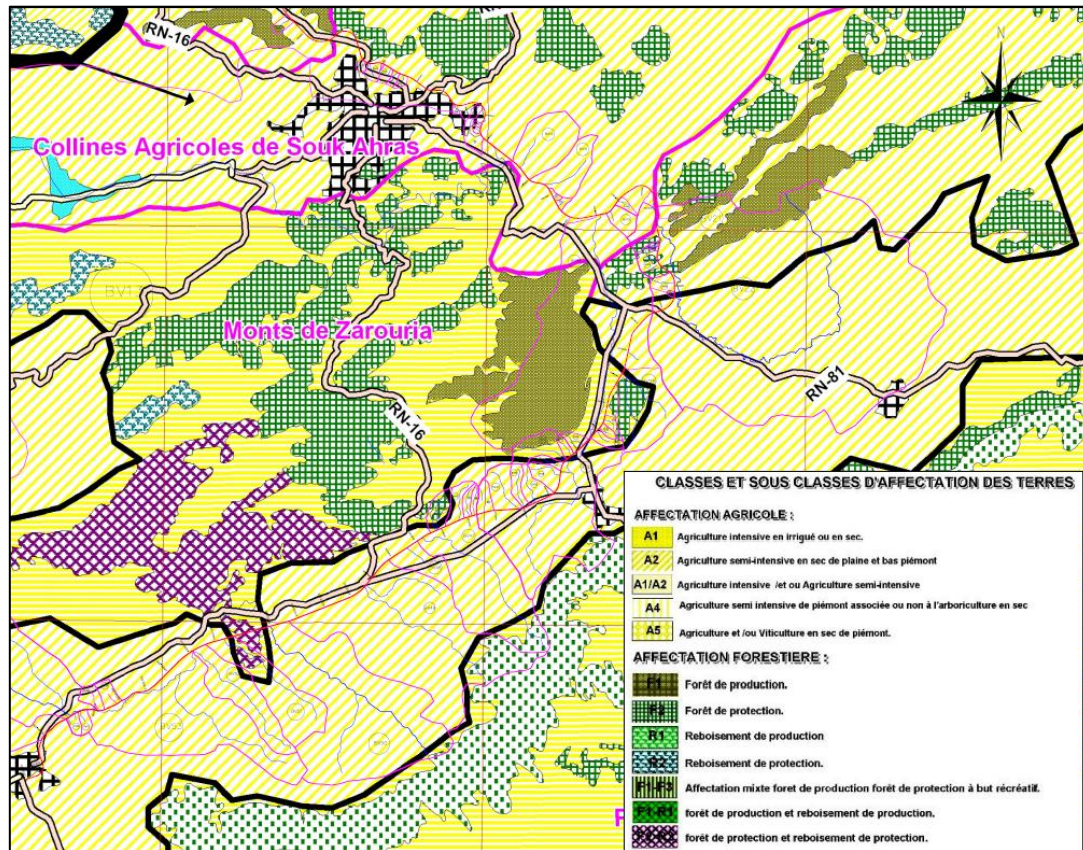


Figure V-11 : Carte d'affectation des terres sur la région de Souk-Ahras

V.2.4.2. Formule de la transition

Cette formule peut être justifiée dans la mesure où le débit décennal fourni par la formule rationnelle peut être parfois plus de 2 fois supérieur à celui fourni par la formule Crupedix. Le débit fourni par la formule de transition s'écrit :

$$Q_{(T)} = \alpha \cdot Q_{R(T)} + \beta \cdot Q_{C(T)}$$

Avec

$Q_{(T)}$: Débit de projet de période de retour T.

$Q_{R(T)}$: Débit fourni par la formule rationnelle pour une période de retour T.

$Q_{C(T)}$: Débit fourni par la formule du Crupedix pour une période de retour T.

α et β : Coefficients de pondération.

α Varie linéairement de 1 à 0 lorsque la superficie (A) croît de 10 à 50 km², d'où :

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

V.2.4.3. Formule du Crupedix

Cette méthode permet l'estimation du débit instantané décennal à partir de la pluie journalière décennale et de la surface

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

Avec

Q_{10} : Débit de crue instantané de fréquence décennale (m^3/s).

A : Superficie du bassin versant (km^2).

P_{10} : Précipitation journalière de fréquence décennale (mm).

R : Coefficient régional qui varie entre 0.2 et 1.8

⇒ $R = 0,2$ pour des terrains perméables (Champagne, Beauce).

⇒ **$R = 1,5$ à $1,8$ pour des terrains imperméables (plateau lorrain, Vendée).**

⇒ $R = 1$ pour des terrains intermédiaires.

🚦 Evaluation du débit centennal à partir du débit décennal de la formule du Crupedix :

$$Q_{100} = b' \times Q_{10}$$

Avec b' un paramètre régionale dépendant de la superficie du bassin versant $b' = 2$ par défaut si $A > 20 \text{ km}^2$

V.2.5. Résultats de calcul des débits pour le présent projet

Dans le tableau ci-dessous, nous calculons les débits centennaux maximaux des Oueds en utilisant les formules expliquées précédemment.

Tableau V-11 : Les débits de crue retenus des bassins versants pour une période de retour de 100 ans

N° BV	PK	A	C_r	T_c	$I(T, T_c)$	$Q_{100} (\text{m}^3/\text{s})$		
		(km^2)		(h)	(mm/h)	Rationnelle	Transition	Crupedix
1	00+560	0.51	0.53	0.18	96.13	7.218	-	-
2	1+045	0.77	0.53	0.22	84.89	9.623	-	-
3	1+750	0.44	0.53	0.16	103.42	6.699	-	-
4	1+930	0.61	0.53	0.19	92.96	8.348	-	-
5	2+910	0.3	0.53	0.20	90.05	3.977	-	-
6	4+730	0.63	0.45	0.39	59.52	4.687	-	-
7	5+160	0.3	0.53	0.16	103.42	4.568	-	-
8	5+835	0.15	0.53	0.10	138.40	3.056	-	-

9	5+970		0.14	0.53	0.12	123.61	2.548	-	-
10	6+145		0.38	0.45	0.29	71.52	3.397	-	-
11	8+975		0.06	0.53	0.07	172.65	1.525	-	-
12	9+680		0.57	0.53	0.17	99.60	8.358	-	-
13	9+930		3.44	0.53	0.63	44.21	22.390	-	-
14	10+830 Oued Medjerdah		582.76	0.40	11.63	7.25	-	-	489.23 ¹
									751.38 ²
15	11+913		3.4	0.53	0.65	43.36	21.704	-	-
16	13+055		2.16	0.53	0.50	51.02	16.224	-	-
17	13+580		0.03	0.53	0.05	212.70	0.939	-	-
18	13+875		0.1	0.53	0.09	147.74	2.175	-	-
19	15+690		6.68	0.53	0.82	37.55	36.928	-	-
20	15+990		0.65	0.53	0.27	74.77	7.155	-	-
21	16+425		0.13	0.63	0.11	130.46	2.968	-	-
22	Oued El Berriche	18+230	66.8	0.40	7.38	9.61	-	-	86.49 ¹
		18+530							109.17 ²
		19+420							

Les grands bassins versants BV14 et BV22, le calcul du débit a été effectué uniquement selon les méthodes de Crupedix et de Mallet et Gauthier. Les débits obtenus, relativement élevés, sont ensuite acheminés vers les viaducs.

¹ : Formule de Crupedix.

² : Formule de Mallet et Gauthier.

V.3. Étude hydraulique

Dans les zones exposées aux événements hydrologiques extrêmes, tels que les crues et les fortes pluies, les études hydrauliques jouent un rôle fondamental dans le dimensionnement des ouvrages transversaux et longitudinaux des lignes ferroviaires. Elles permettent de concevoir des structures aptes à maîtriser les variations des écoulements, garantissant ainsi la durabilité des infrastructures ferroviaires ainsi que la sécurité des usagers et du personnel d'exploitation.

V.3.1. Dimensionnement des ouvrages transversaux

Le principe fondamental de l'assainissement des plateformes ferroviaires repose sur la vérification que, lors d'une pluie intense, le débit à évacuer demeure inférieur au débit maximal admissible par l'ouvrage hydraulique retenu.

Ce débit limite correspond au débit en section pleine (ou au débit d'apport de l'ouvrage hydraulique), et il peut être estimé à partir de la formule de Manning-Strickler.

$$Q_{app} = K_s \times S_m \times R_h^{2/3} \times I^{1/2} \quad \text{Et} \quad R_h = \frac{S_m}{P_m}$$

Avec

Q_{app} [m³/s] : Débit d'apport de l'ouvrage.

K_s : Coefficient de rugosité pour le béton $K_s=70$.

S_m [m²] : Section mouillée de l'ouvrage hydraulique.

R_h [m] : Rayon hydraulique.

I [m/m] : Pente longitudinale de l'ouvrage.

V.3.1.1. Dimensionnement des buses

Le calcul hydraulique des ouvertures circulaires se fait en utilisant la formule de **Manning-Strickler** à la saturation :

$$Q_{app} = Q_{max}$$

Avec

$$S_m = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad \text{Et} \quad R_h = \frac{D}{4}$$

D'où

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

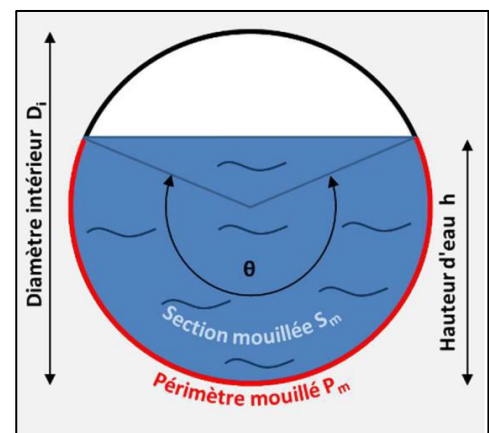


Figure V-12 : Schéma d'un ouvrage busé

Les dimensions sélectionnées pour les ouvrages en buses sont celles qui satisfont aux deux critères suivants :

✓ $Q_{100} < Q_{ps}$ Avec Q_{100} : débit d'apport (de projet Q_{max}).

Q_{ps} : le débit de saturation de l'ouvrage.

✓ **Les conditions d'auto-curage :**

L'auto-curage désigne la capacité intrinsèque d'un réseau d'assainissement à déplacer les particules solides. Ainsi, un bon auto-curage nécessite que la capacité de transport des particules solides soit suffisante pour prévenir leur sédimentation et leur accumulation dans le système.

Ces conditions sont les suivants :

- ✚ $V > 0.6 \text{ m/s}$ Pour : $Q = 0.1 Q_{ps}$.
- ✚ $V > 0.3 \text{ m/s}$ Pour : $Q = 0.01 Q_{ps}$.
- ✚ $V_{ps} < 4 \text{ m/s}$ et $V < 4 \text{ m/s}$

Remarque : Il est bien important de noter que le taux de remplissage des buses doit être $< 80\%$.

⇒ **Exemple du calcul**

Prenons le BV N°5 (PK 02+910) : $Q_{\max(100)} = 3.977 \text{ m}^3/\text{s}$

On prend $K_s = 70$; $I = 0.01$.

$$D = 4^{5/8} \times \left(\frac{Q_{\max(100)}}{K_s \times \pi \times \sqrt{I}} \right)^{3/8} = 4^{5/8} \times \left(\frac{3.977}{70 \times \pi \times \sqrt{0.01}} \right)^{3/8} = 1.253 \text{ m}$$

On choisit un diamètre commercial de **1500 mm**.

On trouve :

$$Q_{ps} = K_s \times S_m \times R_h^{2/3} \times I^{1/2} = 70 \times \pi \cdot \frac{D^2}{4} \times \left(\frac{D}{4} \right)^{2/3} \times \sqrt{I}$$

$$Q_{ps} = 70 \times \pi \cdot \frac{1.5^2}{4} \times \left(\frac{1.5}{4} \right)^{2/3} \times \sqrt{0.01}$$

$$Q_{ps} = 6.429 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow V_{ps} = \frac{Q_{ps}}{S_m} = 3.64 \text{ m/s}$$

$R_q = \frac{Q_{\max(100)}}{Q_{ps}} = \frac{3.977}{6.43} = 0.619 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V = R_v \times V_{ps} \\ H = R_H \times D \end{array} \right\}$ (Rapport des vitesses et des hauteurs voir en ANNEXE B)

Le tableau ci-dessous montre la vérification des 3 conditions d'auto-curage de l'ouvrage busée pour le BV N°05

Tableau V-12: Conditions d'auto-curage de l'ouvrage busé (BV N°05)

Condition	R_q	R_v	V (m/s)	Vérification
$V_{ps} < 4 \text{ m/s}$	0.619	1.051	3.826	Vérifié
$V > 0.3 \text{ m/s}$	0.01	0.32	1.165	Vérifié
$V > 0.6 \text{ m/s}$	0.1	0.64	2.33	Vérifié

$$H = R_H \times D = 0.569 \times 1.5 = 0.854 \text{ m} < 0.8 \times D = 0.8 \times 1.5 = 1.2 \text{ m} \Rightarrow \text{Vérifié}$$

Les résultats des calculs pour les ouvrages busés sont mentionnés au tableau suivant (Tableau V-13) :

Tableau V-13 : Dimensionnement des buses

N°BV	PK	Q_{100}	Pente I	K_s	$D_{calculé}$	Dimension de buse (mm)			$h_{remplissage}$	$\frac{H}{D} < 80\%$	V_{ps}	V	V ($\frac{Q}{Q_{ps}} = 0.01$)	V ($\frac{Q}{Q_{ps}} = 0.1$)	Vérification
		m³/s	m/m		m				m		< 4 m/s	< 4 m/s	> 0.3 m/s	> 0.6 m/s	
5	02+910	3.977	0.121	70	1.253	1 Buse	∅	1500	0.854	56.9	3.64	3.826	1.16	2.33	Vérifié
8	05+835	3.056	0.254		1.135	1 Buse	∅	1500	0.728	48.5	3.64	3.593	1.16	2.33	Vérifié
9	05+970	2.548	0.16		1.060	1 Buse	∅	1500	0.656	43.7	3.64	3.425	1.16	2.33	Vérifié

V.3.1.2. Dimensionnement des dalots

Les dalots sont des ouvrages hydrauliques en béton armé, de section rectangulaire ou carrée, composés d'un radier, de deux murs et d'une dalle. Ils permettent d'évacuer des débits plus importants que les buses et sont définis par leur largeur (B) et leur hauteur (H).

Leur dimensionnement consiste à déterminer la section et la hauteur d'eau utile, en adoptant un taux de remplissage de 0,75 H, à l'aide de l'équation de Manning-Strickler, afin d'assurer l'équilibre entre le débit d'apport et la capacité d'écoulement.

Les dimensions des dalots sont obtenues en écrivant l'égalité du débit des crues et le débit de saturation :

$$Q_{app} = Q_{max} = K_s \times S_m \times R_h^{2/3} \times I^{1/2}$$

Avec

$$S_m = 0.75B \times H \quad \text{Et} \quad P_m = B + 1.5H$$

Donc

$$Q_{app} = 70 \times (0.75 \times B \times H) \times \left(\frac{0.75 \times B \times H}{B + 1.5H} \right)^{2/3} \times I^{1/2}$$

Pour finalement arriver à une équation où la résolution se fait par la méthode itérative :

$$H_{i+1} = \left(\frac{Q_{\max(100)}}{K_s \times \sqrt{I}} \right)^{3/5} \times \frac{(B + 1.5H_i)^{2/5}}{0.75B} \quad \text{Avec} \quad H_0 = \left[\frac{Q_{\max(100)}}{K_s \times \sqrt{I}} \right]^{3/5}$$

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

⇒ **Exemple du calcul**

Prenons le BV N°1 (PK 00+560) : $Q_{\max(100)} = 7.218 \text{ m}^3/\text{s}$

On prend $K_s = 70$; $I = 0.01$; $B = 2 \text{ m}$

Après le calcul itératif de l'équation précédente on obtient : $H=1,148 \text{ m}$, On prend $H=1.5 \text{ m}$.

Donc les valeurs retenues pour cette section de dalot sont : $B=2 \text{ m}$; $H=1.5 \text{ m}$.

Alors $S_m = 2.25 \text{ m}^2$; $P_m = 4.25 \text{ m}$; $R_h = 0.529 \text{ m}$

$$Q_s = K_s \times S_m \times R_h^{2/3} \times I^{1/2} = 70 \times 2.25 \times 0.529^{2/3} \times \sqrt{0.01} = 10.301 \text{ m}^3/\text{s}$$

⇒ **Vérification de la condition pour assurer un écoulement fluvial :**

$$H_c = \sqrt[3]{\frac{Q_s}{g \times B^2}} = \sqrt[3]{\frac{10.301}{9.81 \times 2^2}} = 0.640 \text{ m} < 0.75H = 1.125 \text{ m} \Rightarrow \text{Vérifié}$$

⇒ **Vérification de la vitesse**

$$V = \frac{Q_{\max(100)}}{S_m} = \frac{7.218}{2.25} = 3.208 < 4 \text{ m/s} \Rightarrow \text{Vérifié}$$

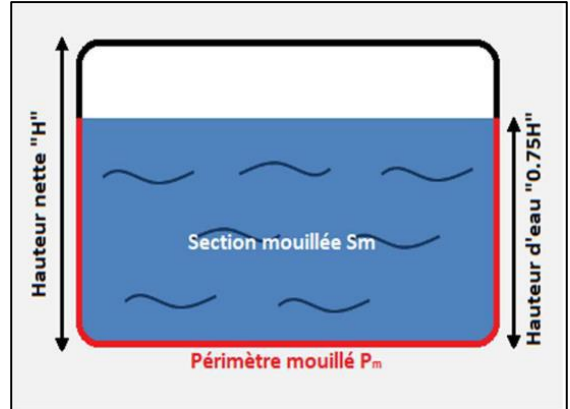


Figure V-13 : Schéma d'un dalot

Tableau V-14 : Dimensionnement des dalots

N°BV	PK	Q_{100}	Pente I	K_s	Dimension de l'ouvrage				S_m	P_m	R_h	$Q_{ps} > Q_{100}$	$h_{remplissage}$	$T_r < 75\%$	$V < 4m/s$	Vérification
		m ³ /s	m/m		B	x	H	n	m ²	m	m	m ³ /s	m		m/s	
1	00+560	7.218	0.246	70	2	x	1.5	1	2.25	4.25	0.529	10.307	0.64	42.70	3.21	Vérifié
2	1+045	9.623	0.257		2	x	2	1	3.00	5.00	0.600	14.939	0.72	36.24	3.21	Vérifié
3	1+750	6.699	0.285		2	x	1.5	1	2.25	4.25	0.529	10.307	0.64	42.70	2.98	Vérifié
4	1+930	8.348	0.260		2	x	1.5	1	2.25	4.25	0.529	10.307	0.64	42.70	3.71	Vérifié
16	13+055	16.224	0.142		2	x	1.5	2	2.25	4.25	0.529	20.614	0.64	42.70	3.61	Vérifié

V.3.2. Dimensionnement des ouvrages longitudinaux

Le drainage longitudinal constitue un élément essentiel pour assurer la collecte et l'évacuation des eaux issues des talus ainsi que des pentes avoisinantes vers la plateforme ferroviaire. Il est généralement assuré par des fossés implantés à un niveau déterminé, permettant de canaliser les eaux vers les ouvrages hydrauliques prévus ou directement vers les exutoires naturels existants.

La détermination des surfaces à drainer repose sur une analyse détaillée des profils en travers, complétée par l'étude des caractéristiques du terrain naturel dans lequel s'inscrit le projet.

L'écoulement des eaux du drainage longitudinal s'effectue uniquement par gravité, en adoptant une pente identique à celle du profil en long de la plateforme. Lorsque la pente naturelle est insuffisante, elle est portée à un minimum de 0,1 % afin de garantir l'écoulement.

Pour le calcul hydraulique de fossé, la formule de Manning Strickler a été utilisée :

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

Où

$$S_m = (b + zh) \times h \quad \text{Et} \quad P_m = b + 2h \times \sqrt{1 + z^2}$$

$$R_h = \frac{S_m}{P_m}$$

I : La pente longitudinale du fossé.

z : La pente des berges.

Les hypothèses suivantes ont été posées pour la conception et le dimensionnement des fossés :

- ⇒ Les fossés en béton (préfabriqué ou coulé sur place) ont un coefficient du rugosité Strickler $K_s = 70$.
- ⇒ La pente longitudinale des fossés en zone déblai et remblai est la même que celles du profil en long de la voie.
- ⇒ Les fossés sont construits selon une forme trapézoïdale avec un talus présentant une pente de 3/2 (H/V).
- ⇒ Le débit à évacuer est la somme des trois débits provenant de la plate-forme, les bermes et les talus c'est-à-dire :

$$Q_{total} = Q_{plat-forme} + Q_{berme} + Q_{talus}$$

Chaque débit est déterminé en utilisant la méthode rationnelle :

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

Avec

Q : Débit de crue de fréquence déterminé en m³/s.

C : coefficient de ruissellement.

i : Intensité de pluie (mm/h) ; **A** : Surface du bassin versant (km²) on considère (la plate-forme, les bermes et les talus).

V.3.2.1. Application sur le projet

Tableau V-15 : Les zones de déblai et remblai les plus défavorables

	Le cas le plus défavorable	
	Déblai	Remblai
PK	19+700	2+910
Longueur (m)	775	220
Hauteur du talus (m)	25	13
La berme (m)	0.5	0.5
Largeur du la plateforme	6.8	6.8

Remarque : Pour l'intensité des pluies on considère le période de retour de 100 ans (a=33.2 ; b=0.62)

⇒ **Débit du plate-forme** $Q_{plate-forme}$

Le calcul sont mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau V-16 : Débit de la plate-forme

Plate-forme						
Cas	C_r	Pente	A	T_c (h)	i	$Q_{plate-forme}$
		(m/m)	km ²	$0.127 \times \sqrt{\frac{A}{P}}$	(mm/h)	(m ³ /s)
Déblai	0.7	4%	0.00527	0.046	223.98	0.229
Remblai	0.7	4%	0.001496	0.025	326.9	0.094

Tableau V-17 : Débit de la berme

La berme						
Cas	C_r	Pente	A	T_c (h)	i	Q_{berme}
		(m/m)	km ²	$0.127 \times \sqrt{\frac{A}{P}}$	(mm/h)	(m ³ /s)
Déblai	0.5	4%	0.0003875	0.012	515.28	0.0277
Remblai	0.5	4%	0.00011	0.0066	746.48	0.0114

Tableau V-18 : Débit de talus

Talus						
Cas	C_r	Pente	A	T_c (h)	i	Q_{talus}
		(m/m)	km ²	$0.127 \times \sqrt{\frac{A}{P}}$	(mm/h)	(m ³ /s)
Déblai	0.5	66.67%	0.008	0.014	468.32	0.52
Remblai	0.5	66.67%	0.001	0.00492	895.61	0.124

D'après les tableaux précédant (**Tableau V-18, V-19, V-20**) on trouve que le débit total est :

Tableau V-19 : Débit total de déblai et remblai

$Q_{total \text{ du déblai (m}^3/\text{s)}}$	0.777
$Q_{total \text{ du remblai (m}^3/\text{s)}}$	0.229

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

$$Q_{total} < Q_s$$

V.3.2.2. Dimensions de fossé proposé

D'après les calculs on prend les dimensions de fossé qui sont mentionnées dans le tableau (**Tableau V-22**)

Tableau V-20 : Dimensions de fossé proposé

b (m)	h (m)	z (m)	S_m (m ²)	P_m (m)	R_h (m)	K_s	I (m/m)	Q_s (m ³ /s)
0.5	0.5	1.5	0.625	2.303	0.271	70	0.0143	2.19

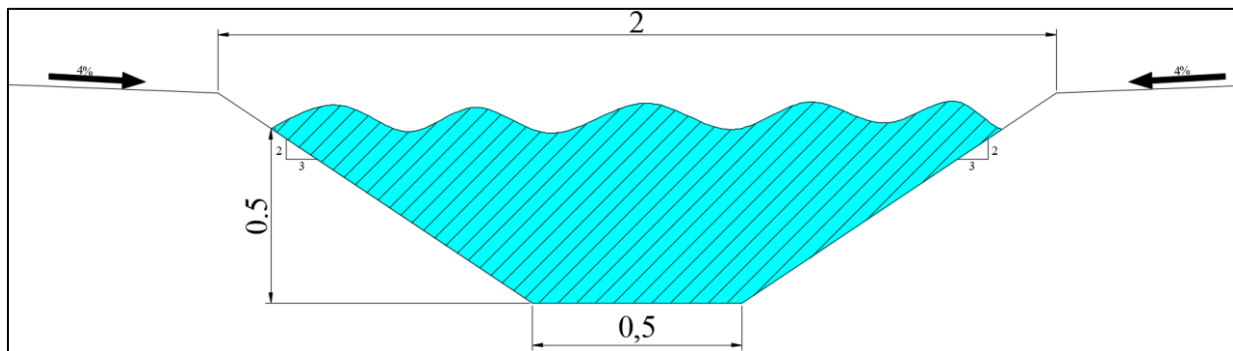


Figure V-14 : Fossé de forme trapézoïdale proposé

V.4. Conclusion

Il est indispensable de mener une étude hydraulique rigoureuse dans le cadre d'un projet ferroviaire afin d'assurer la stabilité et la durabilité de la voie. Par ailleurs, en matière d'assainissement, il est fréquent d'opter pour un léger surdimensionnement des ouvrages hydrauliques. Cette approche permet d'anticiper les insuffisances d'entretien et de renforcer la pérennité ainsi que la sécurité des infrastructures.

CHAPITRE VI
ÉTUDE GEOLOGIQUE ET
GEOTECHNIQUE

VI. ÉTUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

VI.1. Introduction

L'étude géologique et géotechnique constitue une étape fondamentale dans la conception et la réalisation des projets d'ingénierie et de construction. Elle consiste à analyser les caractéristiques des sols et des roches afin de formuler des recommandations techniques fiables et adaptées aux conditions du site.

La géologie permet d'identifier et d'anticiper les risques naturels, tels que les séismes ou les mouvements de terrain, tandis que la géotechnique s'intéresse à l'évaluation de la portance des sols, à la stabilité des fondations et au comportement des ouvrages enterrés.

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

VI.2. Étude géologique

L'étude géologique analyse les formations du sous-sol en examinant leur composition, leur structure et leur évolution. Elle permet d'identifier les différentes couches géologiques, les failles, les zones instables et les aquifères afin d'anticiper les risques pouvant affecter la conception, la construction et l'exploitation de la voie ferrée, tels que les mouvements de terrain, les affaissements ou les infiltrations d'eau.

Elle contribue également à réduire les impacts environnementaux en proposant des mesures d'atténuation adaptées et en distinguant les matériaux réutilisables de ceux de qualité médiocre, assurant ainsi une gestion efficace et durable des ressources du projet.

VI.2.1. Carte géologique de la zone d'étude

La zone d'étude, située dans la région de Souk-Ahras au Nord-Est de l'Algérie, présente un contexte géologique varié et structuré. Elle est marquée par la présence des formations d'âges différents, allant du Trias au Quaternaire, avec une prédominance des unités telliennes (nappes telliennes et numidiennes), ainsi que des dépôts miocènes et quaternaires dans les plaines et le long des vallées, notamment celle de l'oued Medjerda. La carte met en évidence une tectonique active caractérisée par des failles, des contacts anormaux et des structures plissées (anticlinaux et synclinaux), traduisant une évolution géodynamique complexe.

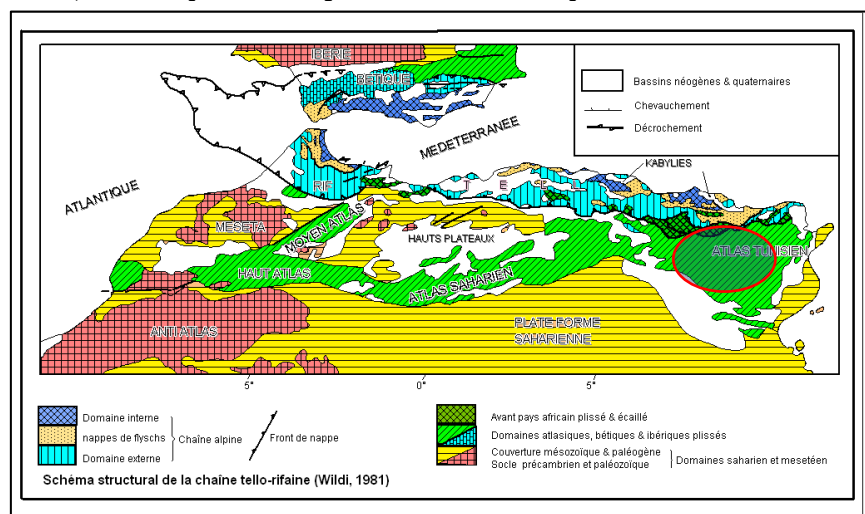


Figure VI-1 : Carte géologique de la zone d'étude

VI.2.2. Aperçu sismique de la zone d'étude

Selon **RPA 2024**, la wilaya de Souk-Ahras est classée en Zone IV, correspondant à une sismicité modérée. Cette classification implique que la région est exposée à des secousses sismiques significatives et que tout ouvrage, qu'il soit ferroviaire, hydraulique ou civil, doit être conçu en tenant compte des prescriptions parasismiques prévues par le règlement. Ainsi, pour les projets situés dans cette wilaya, les structures doivent résister à des accélérations sismiques modérées, garantissant leur sécurité et leur durabilité face aux risques sismiques propres à cette zone.

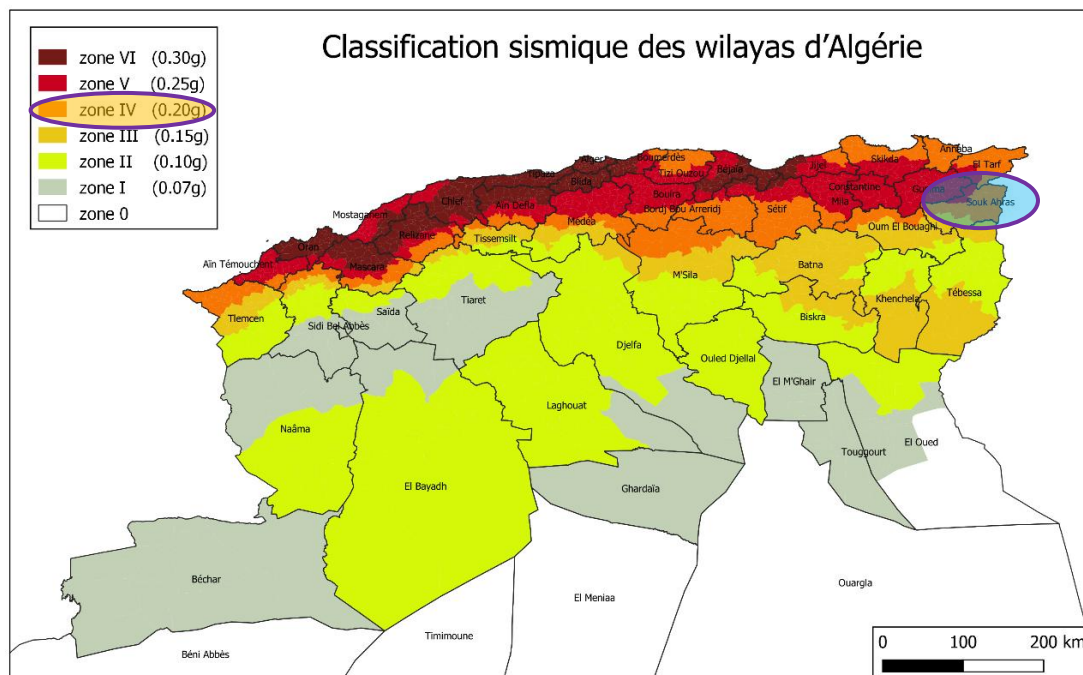


Figure VI-2 : Carte de zonage sismique selon RPA 2024

VI.2.3. Aspect tectonique de la région d'étude

Les Monts de la haute Medjerda constituent un territoire privilégié sur les zones telliennes et sahariennes au-delà de la disparition des hautes plaines. Les deux zones sont en contact, les plis se poursuivent plus ou moins d'une zone à l'autre. Dans la zone saharienne, les plis ont une direction AURASSIENNE Sud - Ouest - Nord - Est. Les synclinaux sont larges à fonds plats, les anticlinaux plus étroits. Seuls les diapirs triasiques et les bassins d'effondrement sont très remarquables.

La tectonique dans la zone tellienne favorise le changement de direction des plis, qui tend à devenir Ouest - Est (dite numidienne) d'une part et provoquent l'apparition des plis - failles d'autre de couverture. Tous les chevauchements n'ont qu'une faible amplitude, celui d'écaille supérieure de Djebel Kelaïla atteint 6 Km, Guern Djedi et Djebel El Hamara ne dépasse pas 5 Km.

VI.2.4. Aperçu géologique local

Les formations géologiques traversées par le tronçon, d'après la carte géologique de la région de Souk-Ahras, présentent une grande diversité lithologique. Elles comprennent des formations superficielles gravitationnelles (éboulis, blocs, sables et limons) ainsi que des alluvions fluviales composées de galets, graviers et dépôts fins. Le substratum est constitué de formations miocènes à base de siltstones et marnes argileuses, d'unités oligocènes argilo-gréseuses, et de formations éocènes marneuses et calcaires. On y retrouve également des terrains du Crétacé supérieur formés de marnes et calcaires variés, ainsi que des formations triasiques argilo-gypso-gréseuses à blocs hétérogènes. Cette diversité traduit un contexte géologique complexe à prendre en compte dans l'étude du projet ferroviaire.

⇒ Du PK00+000 au PK04+000

Le tronçon traverse principalement des formations du Crétacé supérieur, constituées de marnes argileuses et de calcaires, avec la présence locale de formations éocènes et oligocènes composées de marnes, d'argiles et de grès.



⇒ Du PK08+000 au PK15+000

Le tronçon traverse principalement des formations triasiques, constituées de formations argilo-gypso-gréseuses, avec la présence de formations éocènes, miocènes et d'alluvions fluviales dans les zones de vallées.

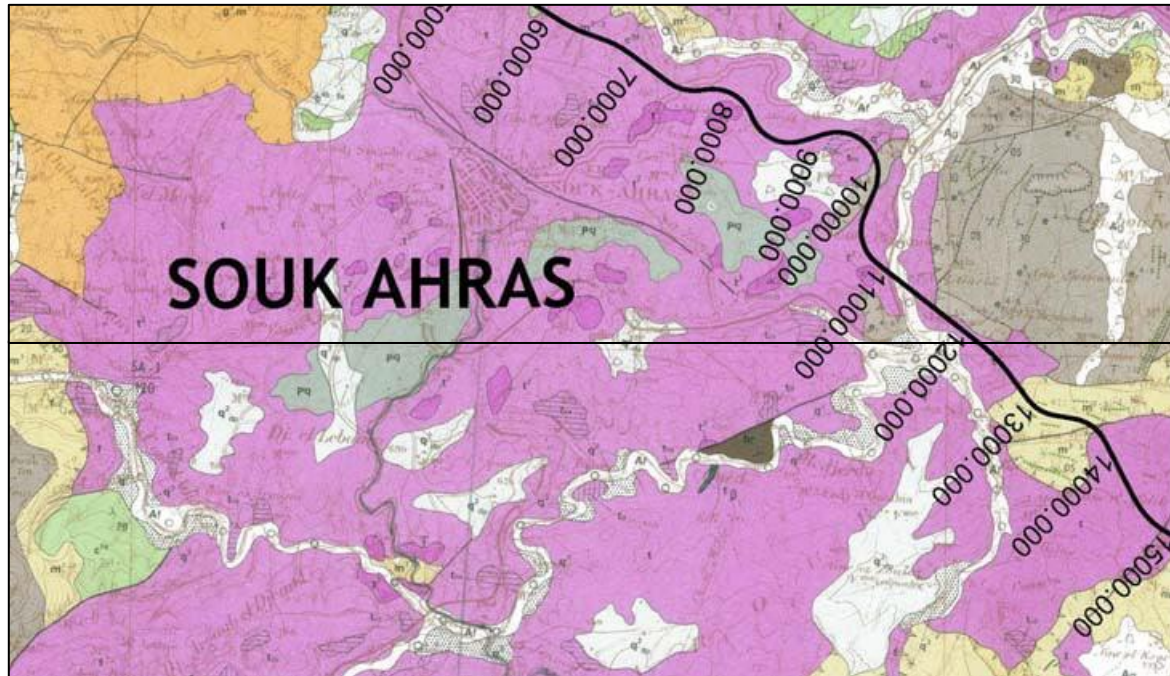


Figure VI-5 : Tronçon du PK 08+000 au PK 15+000 sur la Carte géologiques

⇒ Du PK15+000 au PK20+000

Le tronçon PK15–20 traverse des formations quaternaires superficielles constituées de cailloutis, sables et limons. Il recoupe également des dépôts pliocènes formés de conglomérats, gravélites, grès, argiles et marnes, ainsi que des formations miocènes composées principalement de siltstones, marnes et grès. Enfin, des terrains crétacés constitués de marnes, marno-calcaires et calcaires sont également présents.

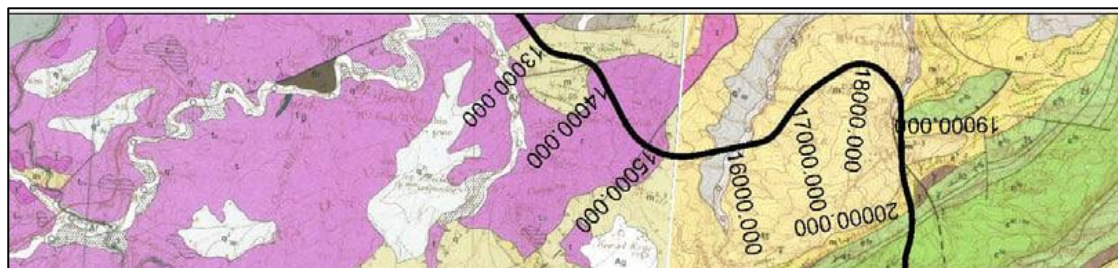


Figure VI-6 : Tronçon du PK 15+000 au PK 20+000 sur la Carte géologiques

VI.3. Étude géotechnique

La géotechnique caractérise les couches géologiques et leurs propriétés mécaniques et physiques. Elle s'appuie sur des investigations sur le terrain et des essais en laboratoire.

Dans un projet ferroviaire, elle fournit une connaissance précise du sol pour évaluer son comportement face aux charges. Des recommandations techniques sont ainsi formulées pour assurer la stabilité et la durabilité des structures.

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

VI.3.1.1. Reconnaissance in-situ

La campagne de reconnaissance géotechnique menée dans la zone d'étude objet a comporté l'exécution des sondages et essais in-situ suivants

- + Douze (12) forages réalisés en phase APD du projet entre 12 m et 100 m de profondeur chacun avec prélèvements d'échantillons intacts et remaniés pour des essais de laboratoire.
- + Trois (3) puits de reconnaissance réalisés en phase APD du projet de 4 m de profondeur.
- + Deux (2) pénétromètre dynamique réalisés en phase APD.
- + Cinq (5) sondage pressiométrique réalisés en phase APD du projet de 12 à 20m de profondeur.

Remarque : La localisation des sondages et essais in -situ réalisés du PK00+000 au PK20+000 sont représentés dans (**Annexe C**).

VI.3.1.2. Reconnaissance au laboratoire

Les échantillons intacts et remaniés prélevés dans les forages à différentes profondeurs ont fait l'objet d'analyse en laboratoire. Elles ont consisté à l'exécution des essais suivants :

Tableau VI-1 : Les essais physiques

L'essai	La norme
Densité sol et roche	NF P94-053 / NF P94-064
Teneur en eau naturelle	NF P94-050
Analyse granulométrique moyenne	NF P94-041
Analyse sédiment-métrique	NF P94-057
Limite d'Atterberg	NF P94-051
Essai VBS (Valeur de Bleu Méthylène)	NF P94-068

Tableau VI-2 : Les essais mécaniques

L'essai	La norme
Proctor normal et modifié	NF P94-093
Portance CBR	NF P94-078
Cisaillement UU	Mode opératoire MS-L3-LCPC
Cisaillement CD	NF P94-071-1
Essai œdométrique	NF P94-090-1
Compression uni axiale sol et roche	NF P94-077 / NF P94-420

Tableau VI-3 : Les essais chimiques

L'essai	La norme
Matières organiques	NF P94-055, NF P94-058 et XP94-047
Teneur en sulfates	NF ISO 11048
Teneur en carbonate	NF P94-048
Teneur en chlorures	NF EN 196-2



Figure VI-7 : Les caisses du forage F40-B-OK du PK 00+554 sur la profondeur (0.00m -5.60m)

VI.3.2. Lithologie de la zone d'étude

En accord avec les résultats de la campagne géotechnique menée dans la zone d'étude. Les principales formations géologiques traversées par le tracé sont détaillées dans le tableau ci-dessous (**Tableau VI-4**) :

Tableau VI-4 : Lithologie de la zone

Forage	Profondeur	La lithologie de la zone d'étude	Forage	Profondeur	La lithologie de la zone
F-40-B-OK	0.00-1.00	Argile sableuse, noirâtre	F-47-B-OK	0.00-3.00	Argile sablo-limoneuse
	1.00-12.00	Argile ferme, jaunâtre		3.00-6.20	Argile beige à brunâtre
F-41-B-OK	0.00-3.80	Colluvion : Argile graveleuse, rougeâtre		6.20-14.80	Argile beige à brunâtre
	3.80-7.00	Calcaire dur, violacé		14.80-19.60	Argile sablo-limoneuse
	07.00-11.00	Calcaire grisâtre		19.60-19.90	Passage du galet et gravas
	11.00-13.70	Sable argileux		19.90-26.00	Argile brunâtre et rougeâtre
	13.70-15.50	Argile grisâtre, altérée		26.00-29.80	Colluvions
	15.50-16.35	Calcaire marneux grisâtre à blanchâtre		29.80-31.20	Argile sablo-graveleuse
	16.35-19.60	Argile sablo-graveleuse brunâtre		31.20-33.30	Argile brunâtre à jaunâtre fermé
	19.60-35.00	Alternance des lits calcaires et des lits argilo-marneux altérés, grisâtre à blanchâtre		33.30-35.50	Marne grisâtre sableuse ferme
F-42-B-OK	0.00-0.30	Remblais		35.50-37.00	Argile violacé ferme
	0.30-0.60	Argile limoneuse violacé		37.00-99.20	Marne grisâtre graveleuse
	0.60-28.00	Argile limono-sableuse et parfois graveleuse jaunâtre	F-48-B-OK	0.00-1.60	Argile sablo limoneuse
	28.00-40.00	Sable moyen et fragments de grès dure jaunâtre		1.60-2.30	Calcaire gréseux
F-43-B-OK	0.00-3.00	Argile sableuse brunâtre à verdâtre, carbonatée		2.30-3.80	Argile sablo-limoneuse

	3.00-10.70	Argile sablo-graveleuse brunâtre à verdâtre, carbonatée, ferme		3.80-23.50	Argile grisâtre ferme
	10.70-44.00	Alternance des lits calcaires		0.00-0.50	Terre végétale
F-44-B-OK	0.00-9.15	Limon sableux et argileux jaunâtre	F-49-B-OK	0.50-5.20	Argile marneuse brunâtre
	9.15-12.50	Marne sableuse grisâtre ferme		5.20-11.90	Grès Oxydé, carbonaté parfois fragmenté
	12.50-20.10	Argile ferme		11.90-12.70	Marne très compacte à dur oxydé fragmenté
F-45-B-OK	0.00-0.60	Remblais		12.70-15.00	Marne très compacte grisâtre
	0.60-3.50	Limon sableux argileux		15.00-20.00	Marne très compacte grisâtre
	3.50-6.10	Sable graveleux	F-50-B-OK	0.00-0.50	Terre végétale
	6.10-6.70	Argile carbonatée		0.50-9.00	Argile marneux brunâtre
	6.70-7.90	Sable fin à moyen légèrement argileux		9.00-15.00	Marne très compacte grisâtre
	7.90-20.60	Sable argileux		15.00-20.00	Marne très compacte à dur fissuré grisâtre
F-46-B-OK	0.00-11.70	Argile limoneux sableuse	F-51-B-OK	0.00-0.30	Terre végétale
	11.70-30.00	Argilite ferme		0.30-24.00	Tuf intercalé par des blocs de marno-calcaire
	30.00-40.00	Marne grisâtre		24.00-30.00	Marne compacte

VI.3.2.1. Synthèse lithologique et stratigraphique des forages réalisés

Les résultats des forages F-40 à F-51 montrent une prédominance de sols argileux à tendance sableuse, limoneuse ou graveleuse, souvent carbonatés et localement marneux. Les couches superficielles sont parfois constituées de remblais ou de colluvions, reposant sur des argiles plus fermes en profondeur. On observe également des alternances de niveaux calcaires, marneux et sableux, avec quelques passages de galets et fragments de grès. Globalement, le terrain présente une stratification hétérogène mais devient plus compact et compétent en profondeur.

On résume les résultats effectués pour ces sondages de type de forage sur le tableau suivant : (**Tableau VI-5**)

Tableau VI-5 : Synthèse des résultats géotechniques sur les sondages réalisés pour les essais du forage

Forage	Profondeur (m)		Analyse granulométrique			W_n	Limite d'Atterberg				Classification GTR et UIC	
			D_{max} (mm)	% < $80\mu m$	% < 2 mm		W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)	I_c	GTR	UIC
F-40-B-OK	2.10	2.45	40	56.05	67.66	25.92	70	27	43	1.02	A4	QS1
	10.50	10.90	10	71.41	98.50	16.86	53	22	31	1.15	A3m	QS1
F-41-B-OK	2.00	3.80	50	11.73	37.42	10.33	/	/	/	/	/	QS2
F-42-B-OK	7.50	8.00	50	36.39	44.61	13.7	46	24	22	1.45	A2ts	QS1
	10.40	10.85	40	76.84	82.55	18.77	29	24	5	1.98	A1	QS1
	23.20	23.70	12.5	73.27	87.20	18.57	32	21	11	1.25	A1	QS1
	29.00	29.30	14	58.23	86.36	13.64	28	15	13	1.1	A2m	QS1
	38.00	39.00	60	30.75	77.87	/	17	13	4	/	C1A1	QS1
F-43-B-OK	7.00	7.40	11.20	77.20	94.76	17.67	40	19	21	1.05	A2h	QS1
	14.10	14.40	12.50	83.51	93.27	12.89	38	17	21	1.18	A2m	QS1
F-44-B-OK	6.40	6.65	14	72.43	88.32	20.26	51	25	26	1.17	A3s	QS1
	13.80	14.05	14	76.41	86.61	11.81	27	13	14	1.09	A2m	QS1

	18.20	18.50	12.50	93.09	96.99	17.11	32	19	13	1.13	A2m	QS1
F-45-B-OK	0.60	3.50	20	80.60	91.36	/	26	19	7	/	A1	QS1
	7.90		25	54.21	70.40	/	/	/	/	/	/	QS1
F-46-B-OK	2.40	2.60	20	74.62	89.75	20.34	29	17	12	0.69	A2th	QS1
	9.60	9.80	20	79.15	91.90	20.25	38	23	15	1.18	A2m	QS1
	13.80	14.10	12.50	44.03	93.93	22.15	38	23	15	1.05	A2h	QS1
	18.80	19.20	10	40.64	94.61	24.45	38	23	15	0.9	A2th	QS1
	24.50	24.80	6.30	57.11	98.43	19.83	37	23	14	1.2	A2m	QS1
	28.70	29.00	5.00	65.68	98.11	18.6	37	20	17	1.09	A2m	QS1
	36.40	37.00	5.00	63.32	98.55	20.22	40	23	17	1.18	A2m	QS1
F-47-B-OK	3.00	3.50	16.00	76.28	81.73	18.01	61	20	41	1.04	A4	QS1
	7.80	8.20	14	93.46	97.25	14.33	53	20	33	1.18	A3s	QS1
	12.40	13.00	20	87.79	93.52	10.83	50	20	30	10.83	A3ts	QS1
	19.90	20.30	20	61.30	84.99	12.93	51	21	30	1.28	A3s	QS1
	33.90	34.35	10	84.84	94.95	20.13	42	21	21	1.04	A2h	QS1
	43.05	43.60	20	57.68	77.18	17.65	/	/	/	/	/	QS1
	59.50	60.00	20	66.45	83.87	22.02	/	/	/	/	/	QS1

	73.50	73.90	16	64.17	78.00	21.96	/	/	/	/	/	QS1
	82.70	83.00	20	65.04	76.14	21.80	/	/	/	/	/	QS1
	98.40	98.80	40	40.62	51.75	15.15	44	30	14	2.04	A2ts	QS1
F-48-B-OK	0.00	01.60	25	67.79	84.37	/	/	/	/	/	/	QS1
	19.50	20.00	14	95.92	97.74	21.96	48	28	20	1.28	A2s	QS1
	31.50	32.00	10.00	92.15	99.02	18.28	49	30	19	1.64	A2ts	QS1

/ : Non réalisé

VI.3.2.2. Puits de reconnaissance

Les puits réalisés ont permis d'effectuer plusieurs essais complémentaires, notamment des analyses granulométriques, des essais de limites de plasticité, des essais Proctor, des essais CBR ainsi que la détermination de la valeur au bleu de méthylène. L'ensemble des résultats obtenus est regroupé dans le tableau suivant, qui présente les caractéristiques géotechniques des formations calcaires et sableuses identifiées.

Les résultats des essais de laboratoire réalisés sur les échantillons des puits de reconnaissance sont mentionnés au tableau (**Tableau VI-6**).

NB : D'après le rapport géotechnique, les puits de reconnaissance réalisés le long du tracé entre le PK 00+000 et le PK 20+000 sont limités à un seul puits sur le tracé principal, complété par deux puits supplémentaires localisés au niveau des gîtes 1 et 2.

Tableau VI-6 : Résumé des résultats des essais de laboratoire réalisés sur les échantillons des puits de reconnaissance.

PU N°	Profondeur	Analyse granulométrique			Limite d'Atterberg				W_n (%)	VBS	Proctor normal		Classification UIC et GTR	
	(m)	D_{max} (mm)	% < $80\mu m$	% < 2 mm	W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)	I_c (%)			$\gamma_{d\text{ opn}}$ (t/m ³)	W_{opn} (%)	GTR	UIC
PU-32-B-OK	0.60-3.60	50	68	79.35	49	24	25	1.48	12.21	1.92	1.68	12.8	A1	QS1
GITE 05 PU-34-B-OK	0.60-3.60	80	9.44	27.67	/	/	/	/	11.70	0.08	1.95	12.9	R23	QS1
GITE 06 PU-35-B-OK	0.60-3.60	80	0.98	1.26	/	/	/	/	11.03	/	/	/	R23	QS1

VI.3.2.3. Pénétrömètre dynamique lourds

Des essais au pénétrömètre dynamique lourd (PDL) ont été réalisés le long du tracé afin de compléter la caractérisation géomécanique des sols. Ces essais ont permis d'obtenir un profil de résistance dynamique et de détecter d'éventuelles hétérogénéités. Le tableau suivant résume la résistance dynamique de pointe

Tableau VI-7 : Résultat de PDL

PDL	Résistance dynamique du pointe R_d (bars)	Observation
PDL-19-B-OK	250	Refus à 9.8 m
PDL-20-B-OK	384	Refus à 2.4 m

Les résultats des essais PDL montrent une résistance dynamique de pointe (R_d) élevée avec des refus enregistrés à différentes profondeurs. L'interprétation de ces données indique la présence de sols très compacts à durs, voire de niveaux rocheux. Le refus observé confirme une forte portance du terrain et une compacité importante des matériaux rencontrés le long du tracé.

VI.3.3. Unités géotechniques

Dans le cadre des sondages carottés, des essais pressiométriques, des pénétromètres dynamiques légers (PDL) et des puits de reconnaissance réalisés le long du tracé, trois unités lithologiques distinctes ont été identifiées. La caractérisation géotechnique de chacune de ces unités a été établie en tenant compte de la nature et de l'origine des formations géologiques, ainsi que des résultats des essais in situ et en laboratoire.

⇒ Unité 01 : ARGILE LIMONEUSE (AGL)

La première unité est constituée de limons et d'argiles. Elle est rencontrée en affleurement entre le PK00+000 et le PK10+000. Entre le PK10+000 et le PK20+000, cette formation est localement recouverte par une croûte d'encroûtement calcaire d'âge quaternaire. Cette unité peut être rencontrée jusqu'à une profondeur d'environ 20 m.

⇒ Unité 02 : ARGILE (AG)

La deuxième unité correspond à une argile grisâtre de consistance ferme. Elle est observée en profondeur à partir d'environ 7 m, notamment entre le PK00+000 et le PK07+000. Elle est généralement surmontée par une couche d'argile limoneuse.

⇒ Unité 03 : ARGILITE (ARG)

Dans le tronçon PK00+000 à PK20+000, l'argilite verdâtre est rencontrée uniquement en profondeur entre le PK05+000 et le PK13+000. Elle constitue le substratum dans cette zone, avec une consistance variant de ferme à rocheuse.

Remarque

Les caractéristiques géotechniques de cette formation sont résumées dans le tableau suivant (**Tableau VI-9**) :

Tableau VI-8 : Les unités lithologique de notre projet du PK00+000 au PK20+000

Unités lithologique		Unité 01	Unité 02	Unité 03
Poids volumique sec	γ_d (KN/m ³)	16.4	18.8	20.02
Poids volumique humide	γ_h (KN/m ³)	19.6	21.5	23.2
Teneur en eau	w(%)	20.98	14.61	12.2
Degré du saturation	Sr (%)	83.45	91.70	97.98
Granulométrie	< 2 mm	90.37	90.47	89.91
	< 80 mm	72.90	86.19	84.41
Limite d'Atterberg	W_L (%)	44.63	40.63	38.98
	W_p (%)	23.67	24.18	25.33
	I_p (%)	21.53	15.75	16
VBS	(%)	1.25	-	-
Compression simple	R_c (KPa)	93	3.04	99.53
Compression à l'odomètre	P_c (KPa)	234	2.77	-
	C_c (%)	21.44	19.92	-
	C_g (%)	5.11	4.7	-
Cisaillement rectiligne UU	C_u (KPa)	47	44	-
	ϕ_u (°)	23.47	15.28	-
Cisaillement rectiligne CD	C' (KPa)	32	30	-
	ϕ' (KPa)	31.53	17.45	-
Analyse chimique	PH	7.96	8.31	-
	Sulfates (%)	0.31	0.27	-
	Carbonates (%)	16.28	4.51	-
	Chlorures (%)	0.075	0.19	-
Classification GTR		A2	A2	A2
Classification UIC		QS1	QS1	QS1

VI.3.4. Interprétations des résultats

Les investigations géotechniques réalisées du 12 juin au 03 juillet 2018 ont permis de caractériser les couches du terrain ainsi que leur comportement mécanique. Le sol rencontré est principalement de nature argilo-sableuse, hétérogène en surface et plus compact en profondeur, avec une prédominance de sols de type QS1.

Les classifications GTR et UIC indiquent une qualité de sol médiocre à moyenne. Les essais de laboratoire et in-situ mettent en évidence une portance globalement satisfaisantes.

Par ailleurs, les résultats des essais au pénétromètre et au pressiomètre confirment une bonne compacité et une faible déformabilité des couches profondes. Toutefois, les valeurs élevées relevées durant la période sèche nécessitent d'être confirmées par des investigations complémentaires réalisées en différentes saisons.

VI.3.5. Localisation des zones à risques

VI.3.5.1. Zones à risques de faible portance

Ces cas correspondent en règle à des zones basses et où les terrains ne possèdent pas une capacité portante suffisante avec l'addition de nouvelle charge. Les résultats des travaux d'investigation géotechnique révèlent que les terrains en place ont de bonnes caractéristiques géotechniques et n'ont pas mis en évidence la présence de sols compressibles.

VI.3.5.2. Zones à risque de cavité souterraines

Une zone comprise entre le PK 11+500 et le PK 15+125 présente un risque d'affaissement et d'effondrement dû à la dissolution des gypses et calcaires, générant des cavités souterraines.

Compte tenu de cette contrainte, des traitements par comblement ou injection sont nécessaires, ainsi que la réalisation de sondages profonds (≈ 30 m) sous chaque appui du viaduc afin de sécuriser le projet.

NB : La zone de cavité située a été détectée à l'aide de l'essai pressiométrique SP-34.

VI.3.5.3. Le risque d'agressivité chimique du sol

Tous les résultats des analyses chimiques du sol réalisés au niveau des échantillons prélevés des sondages ont révélé la présence de sulfates, les teneurs en sulfates varient entre 0.14 et 0.63%, ce qui représente un environnement à un risque d'agressivité chimique modérée vis-à-vis du béton de

L'infrastructure des ouvrages selon la norme FD P18-011 du Décembre 2009. A cet effet, il y'a lieu de prendre des dispositions particulières pour la confection du béton de l'infrastructure.

VI.3.5.4. Zones humides

Les zones humides sont localisées principalement entre PK 1+170 à PK 1+375 et PK 1+925 à PK 2+349, où le niveau d'eau est signalé à environ $Z = 1,40$ m, indiquant une nappe peu profonde. Dans ces sections, les terrains sont constitués essentiellement d'argiles sableuses à argiles fermes, et les recommandations prévoient un traitement en remblai en zone humide.

En dehors de ces tronçons, la majorité du linéaire entre PK 00 et PK 20 est classée en zone sèche.

VI.3.5.5. Zones inondables

Du PK 00 au PK 20, le tracé traverse des zones inondables, en particulier la section comprise entre le PK 17+325 et le PK 19+875, nécessitant des remblais dimensionnés pour garantir stabilité et durabilité.

Les solutions prévues comprennent l'utilisation de matériaux conformes à la ST 590 B (classes CiB3, D3, R21, R22, R41, R42, R61 et R62) et, si nécessaire, la mise en œuvre d'une purge de 0,5 à 1 m de profondeur suivie d'un remplacement par des matériaux granulaires adaptés pour prévenir les remontées capillaires et les désordres dans le corps de remblai.

VI.3.6. Gites d'emprunts et carrières

VI.3.6.1. Gites d'emprunts

Sur le tronçon PK 0 – PK 20, les seules zones d'emprunts identifiées sont les gîtes ZE-01 et ZE-02. Des puits d'exploration avec prélèvement d'échantillons ont été réalisés pour classer les matériaux selon le guide technique de réalisation des remblais et de couche de forme (GTR). Les essais de laboratoire montrent que ces deux gîtes contiennent des matériaux de classe R23, constitués essentiellement de carbonates de calcium.

Tableau VI-9 : Gite d'emprunt proposé

Zone d'emprunt	PK	Position	Classification	
			GTR	UIC
ZE-01 (GITE 05)	11+570	150 m de l'axe de tracé	R23	QS1
ZE-02 (GITE 06)	02+400	300 m de l'axe de tracé	R23	QS1



Figure VI-9 : Zone d'emprunt 1



Figure VI-8 : Zone d'emprunt 2

VI.3.6.2. Carrières

Le long du tracé, plusieurs indices de substance utile à utiliser comme matériaux (ballast, agrégats pour béton) ont été mise en évidence. Le tableau suivant (**Tableau VI-10**) montre les différentes carrières identifiées. :

Tableau VI-10 : Liste des carrières

Nom de la carrière	Localisation	Substance	Utilisation possible
Ain Mesk Carriere SARL	Souk-Ahras	Calcaire	Couche de fondation, Agrégats pour béton Couche de sous-ballast, Couche de forme, Matériaux zone inondable.
Bendahmane extraction et ventre agrégats EURL	M'DAOUROUCH	Calcaire	Couche de fondation, Agrégats pour béton, Couche de sous-ballast, Couche de forme, Matériaux zone inondable.
Carriere EL ARBI EURL	Souk-Ahras	Calcaire	Couche de fondation, Agrégats pour béton, Couche de sous-ballast, Couche de forme, Matériaux zone inondable.
DIB Extraction et preparation de sable EURL	M'DAOUROUCH	Sable	Utilisation pour béton
Carriere ERRADDID EURL	Souk-Ahras	Calcaire	Couche de fondation, Agrégats pour béton, Couche de sous-ballast, Couche de forme, Matériaux zone inondable.
SPA ETRS EPE	Souk-Ahras	Calcaire	Couche de fondation,,Agrégats pour béton, Couche de sous-ballast, Couche de forme, Matériaux zone inondable.
SARL Mohamed Boudiaf	M'DAOUROUCH	Calcaire	Couche de fondation, Agrégats pour béton, Couche de sous-ballast, Couche de forme, Matériaux zone inondable.
Sidk el Ines Eurl	Souk-Ahras	Sable et Calcaire	Couche de fondation, Agrégats pour béton, Couche de sous-ballast, Couche de forme, Matériaux zone inondable.

VI.3.7. Etude de la stabilité

Une vérification de la stabilité à la rupture par glissement est nécessaire (court terme, long terme et accidentel sismique). La stabilité au glissement est effectuée au moyen du logiciel GEO 5 utilisant la méthode des tranches de Bishop. L'analyse de stabilité est réalisée selon les combinaisons suivantes :

$FS > 1.5$ à long terme.

$FS > 1.3$ à court terme.

$FS > 1$ En situation accidentelle (séisme), Les composantes horizontale et verticale de la sollicitation sismique prises en compte dans ce cas sont :

$$\begin{cases} K_h = 0,5 \times 0,15 \times 1,20 \times 1,2 = 0,108 \\ K_v = 0,3 \times K_h = \pm 0,0324 \end{cases}$$

Le calcul de ces composantes est repris du règlement algérien RPA.

Pour les calculs, on a utilisé les caractéristiques suivantes :

- ⇒ Une charge ferroviaire de référence de 30 KN/m².
- ⇒ La vérification de stabilité est effectuée dans deux situations.
- ⇒ Les calculs de stabilité sont réalisés en utilisant la méthode de Bishop.

VI.3.7.1. Cas remblai

Le calcul de stabilité concerne les remblais de grande hauteur ($h \geq 6$ m). Dans le cadre de notre projet, entre le PK00+000 et le PK20+000, quatre zones de remblais importants ont été identifiées. Elles sont présentées dans le tableau suivant (**Tableau N° VI-9**).

Tableau VI-11 : Les résultats de stabilité des remblais

PK début	PK fin	H _{max}	Pente proposé	Longueur berme /hauteur du talus	FS		Observation
					Cas statique	Cas sismique	
00+880	01+080	6.59	3H/2V	Berme de 3m Talus de 6 m	1.54 > 1.5	1.26 > 1.10	Stable
02+765	02+980	13.20	3H/2V	Berme de 3m Talus de 6 m	1.44 < 1.5	1.07 < 1.10	Instable On propose la stabilité par un mur de soutènement côté gauche)
05+780	05+900	13.40	3H/2V	Berme de 3m Talus de 6 m	1.54 > 1.5	1.26 > 1.10	Stable
17+965	18+100	12.35	3H/2V	Berme de 3m Talus de 6 m	1.66 > 1.5	1.31 > 1.10	Stable

⇒ Les résultats détaillés de l'étude de stabilité des remblais, sont donnés sur **ANNEXE C**

VI.3.7.2. Cas déblais

Le calcul de stabilité a été réalisé pour les déblais de grande hauteur ($h \geq 8$ m) identifiés sur le tronçon étudié. Une reconnaissance géotechnique a permis de caractériser les terrains concernés et d'évaluer leur stabilité.

Tableau VI-12 : Les résultats de stabilité des déblais

PK début	PK fin	$H_{\max}$	Pente proposé	Longueur berme /hauteur du talus	FS		Observation
					Cas statique	Cas sismique	
00+000	00+350	12.44	3H/2V	Berme de 3m Talus de 6 m	$1.62 > 1.5$	$1.28 > 1.10$	Stable
06+000	06+344	30	3H/2V	//	$1.71 > 1.5$	$1.33 > 1.10$	Stable
11+550	11+775	16.46	3H/2V	//	$1.97 > 1.5$	$1.16 > 1.10$	Stable
17+400	18+100	25.46	3H/2V	//	$1.75 > 1.5$	$1.40 > 1.10$	Stable
19+275	20+000	25	3H/2V	//	$1.80 > 1.5$	$1.25 > 1.10$	Stable

⇒ Les résultats détaillés de l'étude de stabilité des déblais, sont donnés sur **ANNEXE C**

NB : Une tranchée couverte a été proposé au niveau du déblai au PK 02+000 en raison de la présence du milieu urbaine

Tableau VI-13 : les hypothèses géotechniques utilisé

Nature de sol	γ_h	Caractéristiques de cisaillement			
	(KN/m ³)	C_u (KPa)	ϕ_u (°)	C (KPa)	ϕ (°)
Remblai ordinaire	20	-	-	5	33
Marne	19	60	18	40	25
Argile	19.3	43	18	24	26
Argile graveleuse	19	22	21.8	15	25
Argile carbonaté jaunâtre	20	25	20	15	25
Argilite	20.5	40	22	25	27
Calcaire	23	114	15	76	25
Roche de gypse	22.2	39.1	19.4	26	30

VI.4. Conclusion

L'étude géologique et géotechnique a permis de caractériser les sols et d'identifier les principaux risques géotechniques du projet. Les résultats obtenus ont servi à vérifier la stabilité des ouvrages et à proposer des solutions adaptées garantissant la sécurité et la durabilité de l'infrastructure ferroviaire.



CHAPITRE VII

ASSISE FERROVIAIRE

VII. ASSISE FERROVIAIRE

VII.1. Introduction

L'assise ferroviaire joue un rôle fondamental dans la stabilité et la durabilité d'une voie. Elle répartit les charges générées par le passage des trains et les transmet progressivement au sol naturel. Pour garantir la pérennité du projet, il est essentiel d'étudier le sol support afin d'obtenir une structure stable et résistante aux contraintes liées au trafic et aux variations du terrain.

Ce chapitre présente les principes essentiels de la conception dimensionnelle de l'assise ferroviaire. Nous aborderons les fonctions et les matériaux constituant le corps d'assise, les méthodes de dimensionnement visant à assurer sa robustesse et sa stabilité, ainsi que l'importance du respect des normes internationales pour une infrastructure durable.

VII.2. Les différents dimensionnements de la couche d'assise

Le dimensionnement d'une voie ferrée s'appuie principalement sur deux types de structures : la voie ballastée et la voie sur dalle en béton. Ces deux solutions permettent de transmettre les charges des trains tout en garantissant la stabilité et la longévité de l'infrastructure. Toutefois, elles se distinguent par leur mode de conception ainsi que par les matériaux utilisés.

VII.2.1. Voie ballast

La voie ballastée répartit les charges à travers le ballast, le sous-ballast et le sol, offrant flexibilité, absorption des efforts et facilité d'entretien.

VII.2.2. Voie béton

La voie bétonnée repose sur une dalle rigide qui transmet directement les charges au sol, assurant stabilité et durabilité, particulièrement pour un trafic intense ou à grande vitesse.

VII.3. Dimensionnement de la voie sur dalle en béton

Le dimensionnement de la voie en béton est effectué selon la norme NF EN 16432-2, en considérant les hypothèses suivantes :

VII.3.1. Caractéristiques de la Charge

- ⇒ **Charge à l'essieu** : 22,5 t (225 kN).
- ⇒ **Charge de roue statique (Q)** : 112,5 kN.
- ⇒ **Coefficient dynamique (K_{dyn})** : 1,5 pour tenir compte des effets liés à la vitesse.
- ⇒ **Charge de calcul dynamique (Q_{dyn})**: ($Q_{dyn} = k \times Q = 1.5 \times 112.5 = 168.75 \text{ kN}$)

VII.3.2. Composants de la Voie

- ⇒ **Rail**: UIC 60 (Intertie $I = 3038.3 \text{ cm}^4$, $E = 210 \text{ GPa}$).
- ⇒ **Support** : Traverses monoblocs.
- ⇒ **Entraxe des traverses (a)** : 60 cm.

⇒ **Rigidité totale au siège** (C_{tot}) : 40 kN/mm.

VII.3.3. Caractéristiques de la Dalle

⇒ **Type de dalle** : JPCP (Béton simple jointoyé).

⇒ **Classe de béton** : C30/37.

⇒ **Épaisseur de la dalle (h)** : 25 cm.

⇒ **Support inférieur** : Radier de tunnel (Rigide $E_{V2} = 150$ MPa)

VII.3.4. Répartition des charges

La longueur élastique $L_{él}$ (Modèle de Zimmermann) détermine comment le rail répartit la charge sur les traverses :

$$L_{él} = \sqrt[4]{\frac{4 \times E_R \times I_R \times a}{C_{tot}}}$$

Avec :

$L_{él}$: la longueur élastique en mm.

E_R : le module de Young (N/mm²) du rail ($E_R = 210000$ N/mm²).

I_R : le moment d'inertie vertical (mm²) du rail.

C_{tot} : la rigidité du support de rail.

a : Entraxe des traverses (mm).

$$L_{él} = \sqrt[4]{\frac{4 \times 210000 \times 30383000 \times 600}{50000}} = 743.91 \text{ mm}$$

On calcule la charge P_j verticale s'exerçant sur le i-ème siège de rail par la formule suivante :

$$P_j = \frac{Q}{\sum_{-i}^i \eta(x_i)} \times \eta(x_i)$$

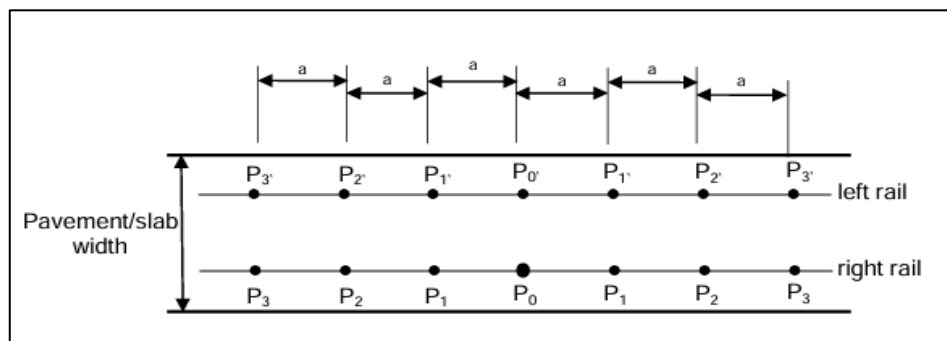


Figure VII-1 : Modèle de Zimmermann

Où $\eta(x_i)$ est une fonction d'influence qui diminue à mesure que l'on s'éloigne de la roue

$$\eta(x_i) = e^{-\frac{x}{L_{\text{él}}}} \times \left(\cos \frac{x}{L_{\text{él}}} + \sin \frac{x}{L_{\text{él}}} \right)$$

- Pour $x_0 = 0$ on calcule la charge transmise par le rail au bloc de béton sous la roue (P_{max}) :

Tableau VII-1 : Calcul de la charge transmise par le rail

i	x_i (m)	$\eta(x_i)$	$P_{\text{max,stat}}$ (KN)	$P_{\text{max,dyn}}$ (KN)
0	0	1	42.52	63.8
1	0.60	0,632	26.87	40.3
2	1.20	0,191	8.12	12.18
3	1.80	-0,0073	-0.31	-0.46

VII.3.5. Vérification de la déflexion

La déflexion statique sous charge de 22,5 t (sans facteur dyn) est :

$$y = \frac{P_{\text{max,stat}}}{c_{\text{tot}}} = \frac{42.52}{50} = 0.85 \text{ mm}$$

Donc La déflexion est inférieure à la limite usuelle de 1 mm, assurant une excellente stabilité géométrique.

VII.3.6. Vérification des contraintes dans la dalle

⇒ **Contrainte de traction due au trafic (B1) :**

On calcule la contrainte de traction pour 1 mètre linéaire

$$\sigma_Q = \frac{M \times y}{I} = \frac{M \times \frac{h}{2}}{\frac{b \times h^3}{12}} \Rightarrow \sigma_Q = \frac{6 \times M}{h^2}$$

On calcule le moment maximal par le modèle de Winkler

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k \times b}{4 \times E \times I}}$$

Telle que

k : Module de réaction du support (0,15 N/mm³).

b : Largeur de la section considérée (calcul pour 1 mètre linéaire).

E : Module d'élasticité du béton (E=33000MPa).

I : Inertie de la dalle ($\frac{bh^3}{12}$). Pour $h=250\text{mm}$, $I = 1.3 \times 10^9 \text{ mm}^4$

$$M(x) = \frac{P}{4 \times \lambda} \times e^{-\lambda x} \times (\cos \lambda x - \sin \lambda x)$$

Pour $x=0$, les termes trigonométriques et l'exponentielle valent 1, la formule devient :

$$M_{max} = \frac{P}{4 \times \lambda}$$

A.N :

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{0.15 \times 1000}{4 \times 33000 \times 1.3 \times 10^9}} = 0.000967 \text{ mm}^{-1}$$

Tableau VII-2 : calcul du moment fléchissant

i	x (m)	P (KN)	M(x) (KN.m)
0	0	63.8	16.5
1	0.6	40.3	1.68
2	1.2	12.18	-0.51

$$M_{max} = M_0 + 2M_1 \Rightarrow M_{max} = 18.84 \text{ KN.m/m}$$

$$\sigma_Q = \frac{6 \times 18.84}{0.25^2} \Rightarrow \sigma_Q = 1.81 \text{ MPa}$$

Contrainte due au gradient thermique (B2)

$$\sigma_{th} = \frac{E \times \alpha \times \Delta T}{6}$$

E : module d'élasticité.

α : coefficient de dilatation thermique ($1/^\circ\text{C}$)

ΔT : variation de température ($^\circ\text{C}$)

$$\sigma_{th} = \frac{33000 \times 10 \times 10^{-6} \times 10}{6} \Rightarrow \sigma_{th} = 0.55 \text{ MPa}$$

La contrainte totale

$$\sigma_{tot} = \sigma_Q + \sigma_{th} = 1.81 + 0.55$$

$$\sigma_{tot} = 2.36 \text{ MPa}$$

 Vérification de la fatigue du béton**a) Méthode S-N (Annexe NN)**

On calcule le nombre de cycles selon la formule suivante :

$$S = a \times N^b$$

S : Contrainte maximale appliquée

a : Coefficient dépendant du matériau et du type d'essai ($a=3.7256$).

N : Nombre de cycles jusqu'à rupture

b : Exposant (constante) $b=-0.0230$.

$$N = 2,05 \times 10^8 \text{ cycles}$$

Soit $2,05 \times 10^8$ pour la rupture

VII.4. Dimensionnement de la voie ballast**VII.4.1. Les différentes couches d'assise ferroviaire pour la voie ballast**

L'assise ferroviaire est une structure multicouche dont le rôle principal est de répartir uniformément les charges des trains pour garantir la stabilité, le nivellement et la sécurité de la voie.

Il est à noter que l'épaisseur et la nature des couches d'assise dépendent :

- ⇒ Des caractéristiques intrinsèques des sols de plate-forme (nature, portance, sensibilité à l'eau et au gel).
- ⇒ Des caractéristiques globales de la plate-forme qui dépendent non seulement des caractéristiques des sols, mais aussi des conditions hydrogéologiques du site.
- ⇒ Des conditions climatiques du site.
- ⇒ Du trafic (tonnages, charges, vitesses).
- ⇒ De l'armement (profil des rails, nature et espacement des traverses).

VII.4.1.1. Le ballast

Le ballast est un granulat de roche concassée (25/50 mm) garantissant la stabilité et le drainage de la voie. Sa haute résistance mécanique (Los-Angeles, Micro-Deval) et son angularité assurent l'immobilisation des traverses sous les charges lourdes. Sa propreté et sa dureté sont essentielles pour la pérennité de la géométrie ferroviaire selon la recommandation techniques SNTF et la norme NF P53-695.

 Rôle du ballast

Le ballast répartit uniformément les charges des trains tout en stabilisant les traverses pour garantir la géométrie de la voie. Sa structure granulaire assure un drainage efficace, amortit les vibrations et limite les déformations thermiques. Enfin, il protège l'infrastructure contre la végétation et l'affaissement, assurant ainsi la sécurité du trafic.

VII.4.1.2. Sous couche (sous ballast)

La sous-couche est l'interface (mono ou multicouche) entre le ballast et la plateforme, composée de graves graduées (0/31.5 mm) et d'éventuelles couches de fondation. Elle assure la transition des charges et inclut une couche anti-contaminante avec géotextile pour protéger le

ballast. Son rôle est important pour la stabilité globale de la voie, surtout sur les sols de faible portance.

Importance de la sous couche

La sous-couche renforce la portance en répartissant les charges sur la plateforme tout en assurant un drainage efficace des eaux pluviales. Elle préserve l'intégrité de la voie en limitant l'érosion, le tassement et la pollution du ballast par les particules fines du sol. Sa fonction de barrière est essentielle pour la stabilité et la durabilité de l'infrastructure ferroviaire.

VII.4.1.3. Couche anti-contaminante

La couche anti-contaminante est constituée d'un sable propre permettant d'éviter la remontée des fines du sol support vers les couches supérieures. Pour les plateformes de faible qualité, notamment de type PF1, un géotextile peut être ajouté afin d'assurer la séparation des matériaux et d'améliorer la stabilité de la plateforme.

VII.4.1.4. La plate-forme

La plateforme ferroviaire est la structure porteuse supportant l'ensemble des couches de la voie. Selon la configuration du terrain, elle est réalisée soit par l'apport de matériaux extérieurs (remblai), soit directement sur le sol d'origine (déblai).

Rôle de la plate-forme

La plate-forme ferroviaire assure plusieurs fonctions essentielles : le drainage des eaux de pluie et des eaux de surface vers les systèmes d'assainissement, l'absorption des vibrations générées par le passage des trains, le rabattement des eaux souterraines et la prévention de l'infiltration des particules fines du sol, telles que les limons et les argiles, dans le ballast.

Pour évaluer l'efficacité de la plate-forme, plusieurs vérifications doivent être réalisées :

- ⇒ Il s'agit d'abord de contrôler la stabilité de la plate-forme en vérifiant sa résistance aux contraintes et aux charges appliquées.
- ⇒ Ensuite, il convient d'analyser la qualité des différents types de sols supportant la plate-forme et de s'assurer que celle-ci respecte les normes et réglementations en vigueur.
- ⇒ Enfin, il est nécessaire de vérifier que la couche supérieure du sol ne se situe pas au-dessus de la nappe phréatique naturelle, ce qui implique de mesurer le niveau de la nappe avant toute opération de rabattement.

VII.4.2. Classification des sols pour la plate-forme

La qualité du sol dépend de sa nature géotechnique et des conditions hydrogéologiques et hydrologiques locales. La nature géotechnique est caractérisée par des paramètres tels que la granularité des sols meubles ou la résistance des sols rocheux.

Les conditions hydrogéologiques doivent également être favorables afin d'éviter l'influence de la nappe phréatique et les problèmes d'infiltration des eaux. L'analyse de ces paramètres permet d'évaluer la qualité globale du sol support. Selon l'étude géologique et géotechnique et la classification basée sur le GTR et les recommandations UIC 719R, le sol rencontré le long du tracé est majoritairement de classe **QS1**. Ainsi, il est recommandé d'adopter une plateforme de type P3 (bonne plateforme) adaptée à ce type de sol.

VII.4.3. La classe de portance de la plateforme

D'après les spécifications du code **UIC 719 R** page 16, nous identifions les trois catégories de plateformes suivantes en fonction de leur capacité portante : **P1** (médiocre qualité), **P2** (moyenne qualité) et **P3** (bonne qualité). Chaque catégorie de plateforme a sa propre capacité à supporter du poids : médiocre pour charges limitées, moyenne pour poids moyen, et haute qualité pour charges importantes grâce à des sols de meilleure qualité. Le tableau ci-dessous (**Tableau VII-3**) présente les classes de plateforme en fonction de la qualité du sol support :

Tableau VII-3 : La classe de portance de la plate-forme

Classe de qualité du sol	Classe de la plate-forme	Couche de forme	
		Qualité	Epaisseur minimal (m)
QS1	P1	QS1	-
	P2	QS2	0.5
	P2	QS3	0.35
	P3	QS3	0.50
QS2	P2	QS2	-
	P3	QS3	0.35
QS3	P3	QS3	-

Plate-forme proposée

Après l'analyse de la classification du sol selon les recommandations de l'UIC, il est proposé d'adopter une plateforme de type **P3**. Pour améliorer ses performances sur un sol de classe **QS1**, l'ajout d'une couche de forme est nécessaire dans la conception. Les données issues des investigations de terrain confirment cette solution, soulignant l'importance de cette couche pour assurer la stabilité et la durabilité de la plateforme.

Couche de forme

Pour garantir une plate-forme de qualité **P3**, il a été convenu de mettre en place une couche de forme de **50 cm** d'épaisseur utilisant un matériau de qualité du sol **QS3** dans les zones où le sol présente une qualité **QS1**.

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

VII.4.4. Calcul des épaisseurs minimales des couches d'assise

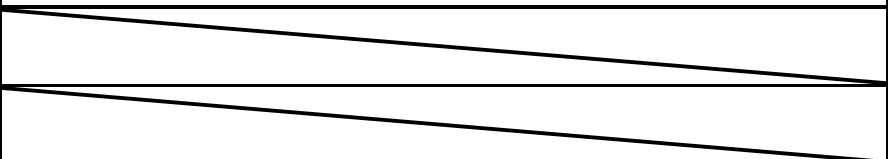
Selon les directives de la fiche UIC 719R sur le dimensionnement des couches d'assise, l'épaisseur du ballast et des sous-couches est déterminée en utilisant la formule suivante :

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

e : étant l' épaisseur de la couche du ballast et des sous couches.

Les données et les propriétés de ces paramètres sont explicitées en annexe conformément au code **UIC 719 R (Voir Annexe D)**. Pour le présent projet, nous avons adopté les valeurs suivantes (fiche **UIC 719 R**) (**Tableau VII-4**)

Tableau VII-4 : Dimensionnement de la couche d'assise

Paramètre	Valeur	Critère de choix
E	0.45	Pour une plate-forme P3
a	0.00	Pour groupe UIC 1
b	0.13	Pour une traverse béton bi-bloc du type VAX U31 avec L=2.24 m
c	0.00	Pour un dimensionnement normal
d	0.05	Pour charge essieux ne dépasse pas 225 KN
f	0.00	Pour les lignes à $V \leq 160$ et pour la plate-forme de portance P3
g	0.00	Pour la couche de forme est en sol QS3, pas de géotextile
Epaisseur de e (m)	0.63	
Epaisseur adopté (m)	0.65	

La couche de ballast mesure **30 cm** comme une épaisseur normal (**recommandations techniques SNTF Chapitre 06 V02 page 15**).

Voici nos propositions d'épaisseurs pour les couches d'assise adaptées à une portance **P3** :

Tableau VII-5 : Structure de la voie du projet

Couche	Epaisseur (cm)	Matériaux
Ballast	30	Grave concassé GC (31.5/50 mm)
Sous ballast	15	Grave 0/31,5 bien graduée.
Couche de fondation	20	Grave sableuse
Couche de forme	50	QS3

VII.5. Les avantages et les inconvénients entre les deux dimensionnements

Tableau VII-6 : Comparaison entre voie béton et voie ballastée

	Voie béton	Voie ballast
Les avantages	• Rigidité élevée et stabilité géométrique à long terme • Faible entretien nécessaire • Durée de vie longue (40–60 ans) • Idéale pour tunnels et lignes à grande vitesse	• Coût initial plus faible • Construction plus rapide • Amortissement des vibrations grâce au ballast
Les inconvénients	• Coût initial élevé • Construction plus longue et complexe • Moins d'absorption des vibrations • Efforts horizontaux transmis directement à la structure	• Entretien fréquent nécessaire (nivellement, remplacement du ballast) • Risque de tassement avec le temps (instabilité géométrique) • Durée de vie plus courte (15–25 ans) • Moins adaptée aux tunnels étroits ou lignes à grande vitesse

VII.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé le dimensionnement d'une voie en béton (SLAB TRACK) dans un tunnel et d'une voie courante ballastée pour les sections ouvertes et ouvrages d'art. Nous avons également effectué une comparaison des deux systèmes en termes de rigidité, entretien et durabilité. Cette étude constitue une réflexion méthodique sur la conception des voies, et pourra servir de référence pour les projets ferroviaires futurs, en optimisant la stabilité, la durabilité et la performance des infrastructures.



CHAPITRE VIII

PROFIL EN TRAVERS

VIII. PROFIL EN TRAVERS

VIII.1. Introduction

Le profil en travers est réalisé après le tracé en plan et le profil en long. Il permet de définir la section type de la plateforme ferroviaire et d'estimer les volumes de déblais et de remblais. Il représente une coupe perpendiculaire à l'axe de la voie, montrant le terrain naturel, la géométrie de la plateforme et les différentes couches de la structure. Il sert aussi à organiser les travaux de terrassement et d'assainissement. Enfin, il contribue à la sécurité, à la stabilité et à la réduction de l'impact environnemental du projet.

On distingue deux types de profil :

VIII.1.1. Profil en travers type

C'est une représentation graphique détaillée qui présente avec précision l'ensemble des éléments constituant la voie, notamment ses dimensions, ses dépendances, la structure de la couche d'assise, ses différentes composantes ainsi que leurs épaisseurs.

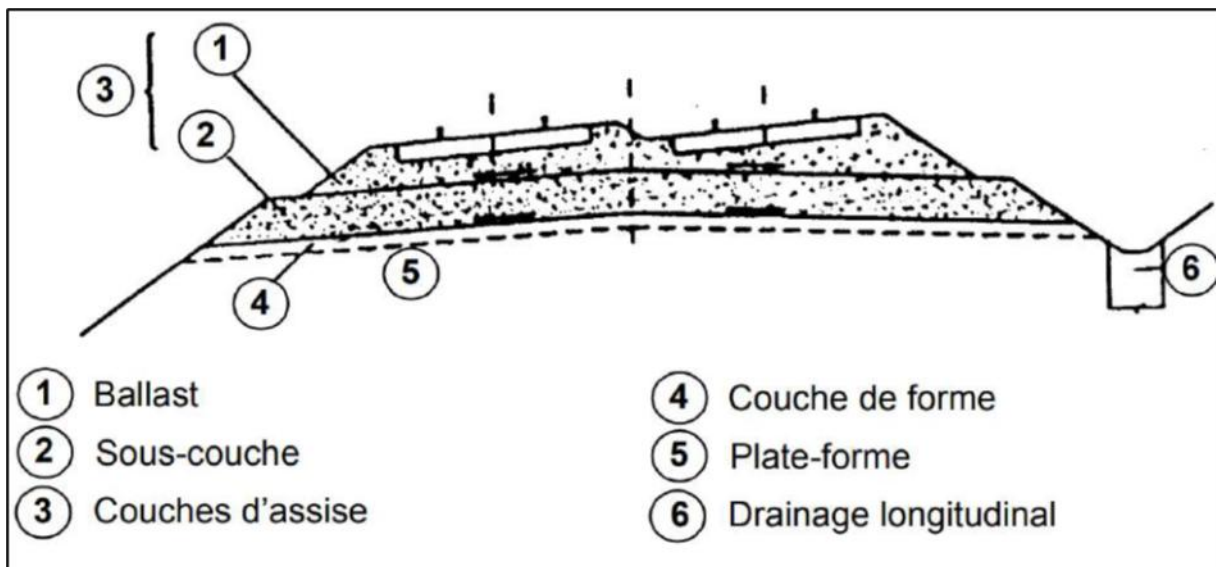


Figure VIII-1 : Profil en travers type

VIII.1.2. Profil en travers courant

Il s'applique au PK considéré et regroupe l'ensemble des données caractérisant la section transversale de la voie à ce point, notamment la cote du terrain naturel (TN), la cote du projet ainsi que le dévers de la plateforme.

VIII.2. Les éléments du profil en travers type

En chemin de fer, le profil en travers type doit présenter l'ensemble des éléments constituant la voie. Tous les éléments ci-après doivent y être clairement représentés, à savoir :

VIII.2.1. Les éléments de la superstructure

- ⇒ Le type de rail.
- ⇒ L'écartement de la voie.
- ⇒ L'entraxe des voies.

- ⇒ Les traverses et leur nature.
- ⇒ Les poteaux caténaires et les caniveaux à câbles (dans le cas des voies électrifiées).
- ⇒ L'épaisseur de la couche de ballast.
- ⇒ La pente latérale du ballast.

VIII.2.2. Les éléments de l'infrastructure

- ⇒ Les pentes transversales des différentes couches.
- ⇒ La pente latérale de la plateforme.
- ⇒ Les épaisseurs ainsi que la désignation de chaque couche.

VIII.2.3. Les éléments du talus

- ⇒ La pente de chaque talus.
- ⇒ Les ouvrages de consolidation Éventuels.

VIII.2.4. Les éléments d'assainissement

- ⇒ Le type et les dimensions des ouvrages de drainage (fossés, drains, etc.).

VIII.3. Profil en travers de notre projet

Le profil en travers type de ce projet correspond à une voie double, de forme symétrique, avec une largeur de plateforme de 13,6 m, aussi bien en déblais qu'en remblais. La voie ferrée est constituée de rails type UIC 60, avec un écartement de 1435 mm, posés sur des traverses bi-bloc dans la voie courante et sur des traverses monobloc dans les tunnels reposant sur une couche de ballast d'une épaisseur de 0,30 m, présentant une pente latérale de 3H/2V. Les épaisseurs des couches de sous-ballast et de la couche de forme sont définies dans le chapitre relatif à l'assise ferroviaire. Les talus sont aménagés avec une pente de 3H/2V en remblai et de 3H/2V en déblai. Enfin, des fossés longitudinaux de dimensions de $h = 0,5$ m et $b = 0,50$ m, avec une pente de 2/3, sont réalisés au pied des talus afin d'assurer le drainage.

Remarque

Lors d'un raccordement en pleine courbe, les épaisseurs de toutes les couches, à l'exception du ballast, demeurent constantes. Le dévers nécessaire est obtenu par une augmentation de l'épaisseur du ballast.

Par ailleurs, le projet comporte plusieurs profils en travers adaptés, notamment au niveau des zones inondables et humides, où il est prévu la mise en place d'un géotextile anti contaminant autour du noyau de remblai, associé à des enrochements latéraux (**voir chapitre XI**).

VIII.4. Calcul des cubatures

Les volumes de terrassement correspondent aux quantités de déblais et de remblais nécessaires pour adapter le terrain naturel et assurer une plateforme conforme au tracé du projet. Leur évaluation repose sur plusieurs éléments essentiels, notamment les profils en long, les profils en travers ainsi que les distances entre ces profils. Dans le cadre de notre projet, ces volumes ont été déterminés à l'aide du logiciel COVADIS 16.

Les résultats de calcul sont présentés et résumés dans le tableau suivant (**Tableau VIII-1**) :

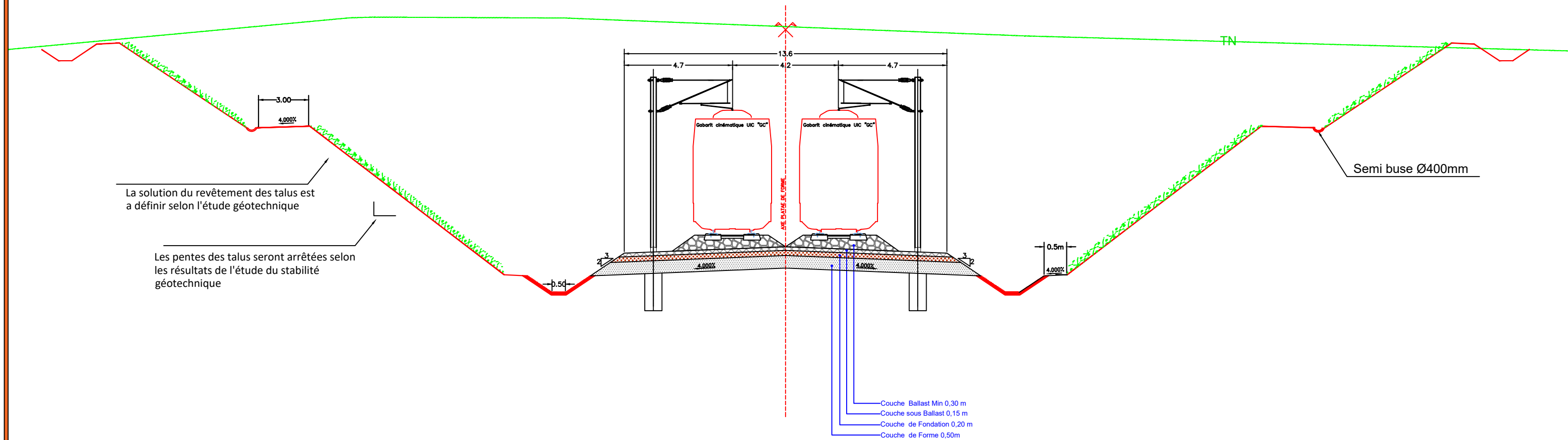
Tableau VIII-1 : Calcul des cubatures

Nature	Déblai	Remblai	Ballast	Sous ballast	Couche de fondation	Couche de forme
Volume (m ³)	3 377 911.25	228 235.36	91 483.58	15 049.57	20 804.80	55 938.03

VIII.5. Conclusion

En définissant la section type projetée ainsi que les volumes de déblais et de remblais, tout en intégrant les contraintes environnementales, cette étape contribue à la réalisation d'une infrastructure ferroviaire optimisée en matière de sécurité, d'efficacité et de durabilité. Les profils en travers jouent ainsi un rôle essentiel dans la précision de la conception et de l'exécution des projets, en permettant de concilier les exigences techniques, économiques et environnementales.

PROFIL EN TRAVERS TYPE DEBLAI
ECH 1/150



PROJET DE FIN D'ETUDES

Etude en APD du Rectification et/ou dédoublement du tracé de la ligne minière Est section centre : BOUCHEGOUF-OUED KEBRIT sur le tronçon PK00+000 au PK20+000 avec conception de la gare de SOUKAHRAS

Réalisé par

BOUGOUTTAYA .
Mahmoud
MEKIOUI . Chawki
Ayoub

Encadré par

Mr.RAMDANE Ismail

Echelle

1/150

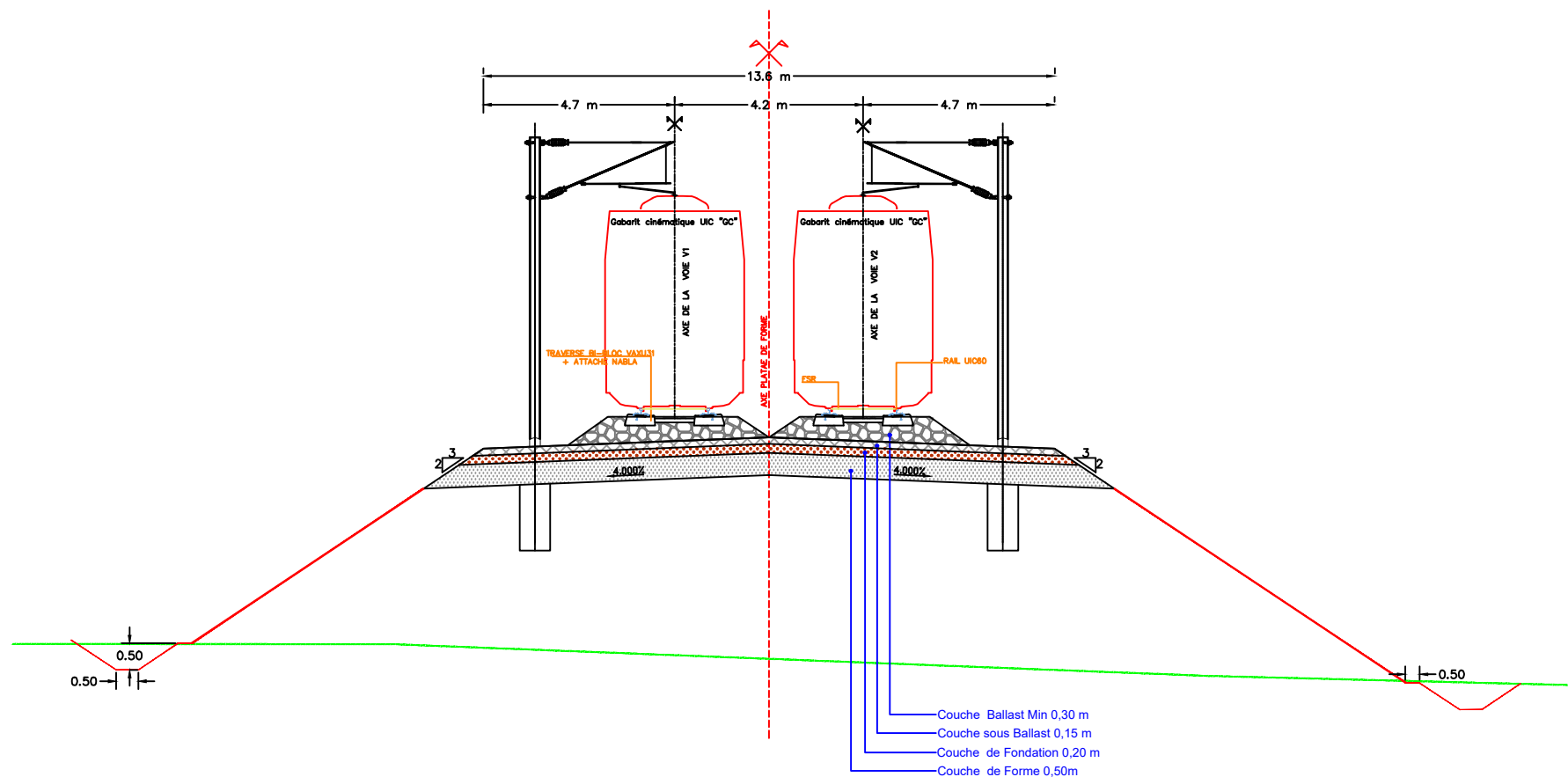
Nom de la planche

Profil en travers
type en déblai

Année universitaire

2025 / 2026

PROFIL EN TRAVERS TYPE REMBLAI
ECH 1/150



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

PROJET DE FIN D'ETUDES

Etude en APD du Rectification et/ou dédoublement du tracé de la ligne minière Est section centre : BOUCHEGOUF-OUED KEBRIT sur le tronçon PK00+000 au PK20+000 avec conception de la gare de SOUKAHRAS

Réalisé par

BOUGOUTTAYA .
Mahmoud
MEKIOU . Chawki
Ayoub

Encadré par

Mr.RAMDANE
Ismail

Echelle

1/150

Nom de la Planche

Profil en travers
type en remblai

Année universitaire

2025 / 2026

CHAPITRE IX

TERRASSEMENTS ET OUVRAGES

IX. TERRASSEMENTS ET OUVRAGES

IX.1. Introduction

Les terrassements et les ouvrages de génie civil constituent les fondements d'un projet ferroviaire. Les travaux de déblai et de remblai permettent d'adapter le terrain et d'assurer la stabilité de la plateforme ferroviaire. Les ouvrages tels que les ponts, viaducs, tunnels et passages dénivelés garantissent le franchissement des obstacles naturels et artificiels. Leur conception doit intégrer les contraintes géotechniques, hydrologiques et environnementales. Ensemble, ces aménagements assurent la continuité, la sécurité et la performance du réseau ferroviaire.

IX.2. Lot terrassements

Les terrassements sont essentiels dans la construction ferroviaire, car ils permettent d'adapter le terrain pour créer une plateforme stable. Ils comprennent les déblais, qui consistent à enlever les matériaux, et les remblais, qui servent à rehausser le terrain. Ces travaux incluent aussi le décapage et la mise en place des couches comme la sous-couche et le ballast. Ils génèrent des talus pouvant présenter des risques de glissement, surtout pour de grandes hauteurs. En général, les terrassements se réalisent en trois étapes : extraction, transport et mise en place des matériaux.

IX.2.1. Objectifs des terrassements

Les terrassements jouent un rôle essentiel dès le début du projet ferroviaire, car ils permettent de préparer une plateforme stable, durable et adaptée au passage des trains, tout en prenant en compte les contraintes techniques et environnementales.

- ⇒ Assurer une surface stable pour le passage des trains.
- ⇒ Utiliser des matériaux adaptés et de bonne qualité.
- ⇒ Protéger les zones sensibles (zones humides, zones inondables, habitats naturels).
- ⇒ Stabiliser les talus pour éviter les glissements.
- ⇒ Assurer un bon drainage pour éviter l'eau et l'érosion.
- ⇒ Réduire les nuisances sonores et vibratoires.
- ⇒ Respecter les normes environnementales.
- ⇒ Garantir la sécurité des travailleurs.

IX.2.2. Pente des talus en déblai et en remblai

Lors de la conception des ouvrages en terre, une attention particulière est accordée à la stabilité des talus, qu'il s'agisse de déblais ou de remblais. Les pentes de talus généralement adoptées, conformément au chapitre 07.2.2 « Ouvrages en terre » du référentiel technique de la SNTF, sont exprimées sous forme de rapport entre la base (V) et la hauteur (H), comme suit :

- ⇒ **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.

Les pentes des talus doivent être définies de manière à garantir la stabilité globale de l'ouvrage, en prenant en compte plusieurs paramètres essentiels : les caractéristiques

géotechniques des sols en déblai et des matériaux de remblai, la hauteur de l'ouvrage, ainsi que la configuration du terrain et les risques naturels du site.

Remarque

Dans le cadre de notre projet, une pente de **3H/2V** est adoptée pour les remblais et une pente de **3H/2V** pour les déblais, suite à une étude de stabilité des talus vis-à-vis du glissement réalisé dans le chapitre « Étude géologique et géotechnique ».

IX.2.3. Les banquettes

Les banquettes, disposées le long des talus ferroviaires, jouent un rôle important dans la stabilité des ouvrages et l'amélioration du drainage des voies. Leur bonne conception permet de contrôler les pentes, de limiter l'érosion et d'assurer la durabilité des infrastructures ferroviaires.

Largeur optimale : généralement comprise entre 1 et 3 m, afin de faciliter l'accès pour la maintenance tout en garantissant la stabilité du talus.

Pente idéale : de l'ordre de 2 à 4 %, permettant un bon écoulement des eaux et évitant leur stagnation.

Remarque

Pour notre cas une banquette de largeur de 3 m et une pente de 4% est utilisée pour la construction des talus du projet.

IX.2.4. Protection des talus

Les talus des ouvrages en terre nécessitent une protection afin d'éviter la dégradation des matériaux superficiels et de préserver leurs caractéristiques face aux agents climatiques (eau, gel, soleil).

La végétalisation consiste à recouvrir les talus d'une couche de terre végétale suivie d'un ensemencement ou de plantations. Elle permet de limiter le lessivage et le ravinement, d'améliorer la stabilité superficielle des talus et d'intégrer les ouvrages dans leur environnement naturel.

Dans le cas des talus en déblais, une couche minimale de **30 cm** de terre végétale est prévue dès l'ouverture des excavations, avec des espèces végétales adaptées, afin de réduire l'érosion due au ruissellement superficiel et d'assurer une meilleure protection des surfaces.

IX.2.5. Structure des remblais

Les remblais en zones particulières sont conçus avec des matériaux adaptés et des couches bien contrôlées afin d'assurer la stabilité et le bon drainage. Des mesures de renforcement peuvent être ajoutées selon les conditions du terrain pour éviter les tassements et les glissements, garantissant ainsi la durabilité et la sécurité de l'ouvrage.

IX.2.5.1. Remblai en zone inondable

Les zones inondables identifiées le long du tracé se situent entre le PK 17+325 et le PK 19+875. Dans ces secteurs, les remblais doivent être dimensionnés et conçus conformément aux prescriptions du référentiel technique en vigueur (**Voir ANNEXE C**).

Les remblais en zones inondables sont réalisés avec des matériaux spécifiques adaptés à ces conditions. Leur base est constituée de matériaux de zone inondable (ZI) jusqu'à une cote située au minimum à 50 cm au-dessus du niveau des plus hautes eaux (NPHE). De plus, un géotextile non tissé assurant les fonctions de séparation et de filtration est mis en place entre les matériaux d'enrochement et les couches du remblai afin d'éviter le mélange des matériaux et garantir la stabilité de l'ouvrage.

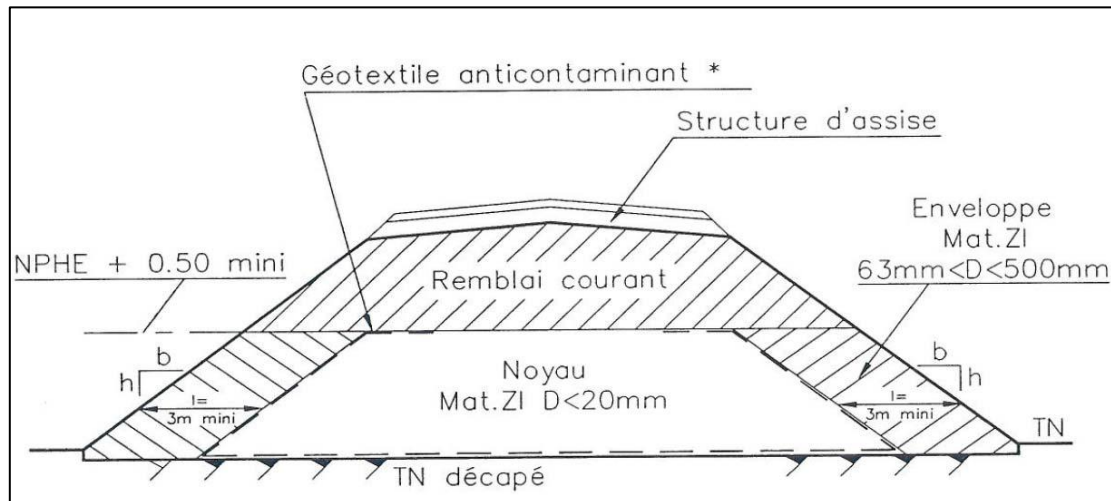


Figure IX-1 : Remblai en zone inondable

IX.2.5.2. Remblai en zone humide

Les zones humides sont situées entre le PK 1+170 au PK 1+375 et PK 1+925 au PK 2+349. Des dispositions particulières seront mises en œuvre afin d'éviter les remontées capillaires pouvant affecter la stabilité du remblai. À cet effet, un géotextile filtrant ainsi qu'une couche drainante en matériaux granulaires d'une épaisseur minimale de 30 cm, seront disposés à la base du remblai afin d'assurer la portance (**Voir ANNEXE C**)

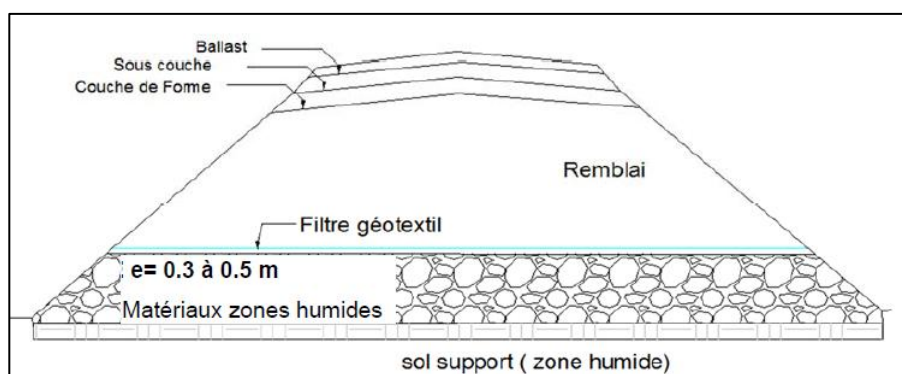


Figure IX-2 : Remblai en zone humide

IX.2.6. Le compactage

Le compactage est une étape fondamentale dans la réalisation des ouvrages en terre, car il influence directement leur stabilité et leur durabilité. Plusieurs paramètres techniques doivent être maîtrisés pour garantir une bonne qualité d'exécution, ces paramètres sont :

- ⇒ La nature du sol, le type de compacteur utilisé et l'état d'humidité influencent les taux de compactage ainsi que les modules de déformation requis.
- ⇒ L'épaisseur des couches ainsi que l'énergie de compactage doivent être définies et contrôlées avec précision.
- ⇒ Des ajustements comme l'arrosage ou l'essorage du sol peuvent être nécessaires pour améliorer le résultat.
- ⇒ La méthode de compactage est généralement définie à partir d'essais sur site ou selon des recommandations techniques, notamment celles du guide SETRA–LCPC pour les travaux de terrassement.

IX.2.7. Réutilisation des matériaux excavés

Compte tenu des investigations géotechniques réalisées, les matériaux rencontrés entre le PK00+000 et le PK20+000 sont principalement des sols argilo-sableux alluvionnaires de qualité géotechnique médiocre à moyenne, classés majoritairement QS1 selon les classifications GTR et UIC. Les travaux d'excavation dans cette section concerneront essentiellement ces matériaux, dont seule une faible partie pourra être réutilisée dans la construction des remblais, sous réserve de satisfaire aux exigences géotechniques et aux critères de portance requis.

Les matériaux présentant des caractéristiques insuffisantes ou un comportement difficilement maîtrisable en remblai seront évacués vers des dépôts définitifs. Par conséquent, la majeure partie des remblais du projet sera réalisée à l'aide de matériaux sélectionnés provenant de gîtes d'emprunt adaptés, offrant de meilleures caractéristiques mécaniques et une meilleure stabilité.

IX.3. Lot ouvrages d'art

Le lot des ouvrages d'art regroupe les structures permettant d'assurer la continuité du tracé ferroviaire en franchissant les obstacles naturels et artificiels. Il comprend principalement les ponts, viaducs et tunnels, implantés selon la topographie et les contraintes du terrain. Leur rôle principal est de garantir la continuité, la sécurité et la stabilité de la voie ferrée.

IX.3.1. Influence du choix des ouvrages d'art

Dans tous les cas, le choix du type d'ouvrage est déterminé par deux grandes catégories de contraintes.

Contraintes naturelles : elles regroupent les caractéristiques du site telles que le débit des eaux et la nature du sol, qui sont propres à l'environnement du projet.

Contraintes techniques : elles concernent les paramètres de conception et d'exécution, comme la portée de l'ouvrage, les charges à supporter et les méthodes de réalisation.

Par ailleurs, plusieurs critères doivent également être pris en compte, notamment :

- ⇒ L'obstacle à franchir (voie ferrée, route, cours d'eau, etc.) influençant la forme de l'ouvrage.
- ⇒ Le programme de charges que la structure doit supporter.
- ⇒ Le gabarit imposant les dimensions maximales autorisées.
- ⇒ Le tirant d'eau pour les ouvrages en milieu hydraulique.

- ⇒ L'intégration architecturale dans le site afin d'assurer une bonne insertion paysagère.
- ⇒ Les contraintes de construction liées à la sécurité et au respect des normes en vigueur.

IX.3.2. Viaducs

Les ponts et viaducs constituent des ouvrages essentiels pour la voie ferrée. À ce titre, leur conception repose sur l'étude de trois interfaces principales, présentées comme suit :

1 ère interface : L'interaction voie/ouvrage au niveau des joints.

2 -ème interface : La pose de la voie sur ouvrages (viaducs).

3 -ème interface : L'interface avec les équipements.

IX.3.2.1. L'interaction voie/ouvrage au niveau des joints

IX.3.2.1.1. Définition des joints et des appareils de dilatation

Les joints de dilatation sont des espaces ou dispositifs placés dans les ouvrages (comme les ponts) pour permettre les mouvements dus aux changements de température.

Les appareils de dilatation (ADD) sont des équipements installés dans la voie ferrée, près de ces joints, pour permettre au rail de se dilater et de se contracter sans créer de contraintes.



Figure IX-3 : Dispositif d'un appareil de dilatation

IX.3.2.1.2. Rôle des appareils de dilatation (ADD)

Les appareils de dilatation permettent au rail de se dilater et se contracter sous l'effet de la température.

Ils servent à :

- ⇒ Absorber les mouvements du rail.
- ⇒ Éviter les contraintes excessives dans la voie.
- ⇒ Assurer la continuité du passage des trains.
- ⇒ Garantir la sécurité et la stabilité de la voie.
- ⇒ Limiter les efforts dans la LRS.

Remarque

Les viaducs de notre tracé présentent des longueurs supérieures à 60 m, dépassant ainsi les limites admissibles sans dispositif de dilatation (60 m pour structures métalliques et 90 m pour structures en béton ou mixtes). Par conséquent, la mise en place d'un appareil de dilatation (ADD) est nécessaire afin de maîtriser les effets thermiques et d'assurer le bon comportement de l'interaction voie-ouvrage. Une étude spécifique est requise dans le cas d'une voie directe, conformément aux recommandations de la norme UIC 774-3R.

IX.3.2.1.3. Le souffle

Le souffle d'un ouvrage d'art (pont ou viaduc) correspond au déplacement longitudinal total de la structure (déplacement relatif rail-pont), principalement au niveau du tablier, causé par les variations de température et les effets différés du béton.

Le souffle d'un ouvrage dépend principalement de la longueur du tablier, des variations de température, des propriétés du matériau ainsi que des déformations différées du béton (retrait et fluage). Plus ces paramètres sont importants, plus le déplacement longitudinal de la structure augmente.

L'expression du souffle est donnée comme suit :

$$\Delta_{\text{Souffle}} = \Delta_{\text{thermique}} + \Delta_{\text{retrait}} + \Delta_{\text{fluage}} + \text{marge de sécurité}$$

Avec

$\Delta_{\text{thermique}}$: C'est le dilatation thermique ($\Delta_{\text{thermique}} = \alpha \times L \times \Delta T$).

Δ_{retrait} : Retrait du béton ($\Delta_{\text{retrait}} = \varepsilon_R \times L$).

Δ_{fluage} : Fluage du béton ($\Delta_{\text{fluage}} = \varepsilon_F \times L$).

Application dans le projet

On prend les données suivantes par hypothèses (manque des données pour les viaducs).

Dans notre tracé le grand viaduc selon sa longueur est situé au PK06+344 de longueur du 2756 mètres, on divise ce viaduc sur 7 tronçons (On ne calcule pas le souffle sur toute la longueur d'un seul bloc, sinon les déplacements deviennent trop grands et irréalistes pour un seul appareil de dilatation).

Donc on trouve $L \approx 400$ mètres.

D'après le calcul on trouve les valeurs suivantes :

Tableau IX-1 : Les paramètres de calcul de souffle

Grandeur	α (1/C°)	L (m)	ΔT (C°)	ε_R	ε_F
Valeur	12×10^{-6}	400	40	0.0003	0.0003
Dilatation thermique (mm)	192				
Retrait de béton	120				
Fluage du béton	120				
Le souffle	432				
Marge de sécurité (1.1×souffle)	475.2				

IX.3.2.1.4. Le choix de l'appareil de dilatation

Le choix de l'appareil de dilatation est effectué en fonction du déplacement longitudinal maximal du tablier estimé à environ 432 mm. Après application d'une marge de sécurité, le déplacement de dimensionnement atteint environ 475.2 mm. Afin d'assurer la continuité de la voie ferrée et la sécurité de l'exploitation, un appareil de dilatation de type modulaire (type 1977 ou équivalent) est retenu, avec une capacité d'ouverture de ± 300 mm, soit un déplacement total de 600 mm. Ce dispositif est adapté aux grands ouvrages ferroviaires, permet une bonne répartition des déplacements et assure la continuité du rail UIC 60. Ce choix est conforme aux pratiques de conception des ouvrages ferroviaires et aux recommandations de l'UIC.

Le schéma d'un appareil de la dilatation est mentionné comme suit

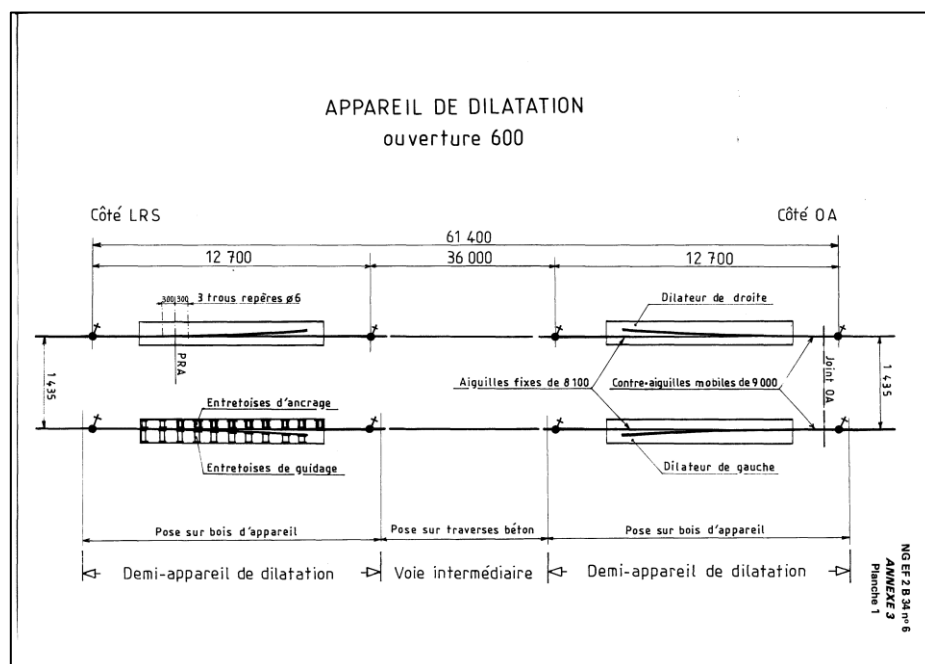


Figure IX-4 : Appareil de dilatation d'une ouverture de 600 mm

IX.3.2.2. La pose de la voie sur ouvrages (viaducs)

IX.3.2.2.1. Particularités de la voie sur ouvrages

Sur les ouvrages d'art tels que les ponts et viaducs, la voie ferrée est posée sur un support rigide (tablier en béton ou métallique), contrairement à une voie en pleine plateforme. Cette configuration rend la voie plus sensible aux variations thermiques et aux déformations de la structure.

IX.3.2.2.2. Types de pose de la voie sur ouvrages

On distingue principalement :

- ⇒ La voie sur ballast, où une couche de ballast est maintenue sur l'ouvrage.
- ⇒ La voie sur dalle, où les rails sont fixés directement sur une dalle en béton.

Dans le cas étudié, on considère une **pose avec ballast**.

IX.3.2.2.3. Contraintes et dispositions techniques

La voie sur ouvrage est soumise à plusieurs contraintes, notamment les effets de la dilatation thermique et les interactions entre la voie et la structure.

Dans ce cas, la plateforme ballastée est définie avec :

- ⇒ Une épaisseur de ballast de 35 cm,
- ⇒ Une pente latérale de 66,67 %, assurant le drainage des eaux et la stabilité du ballast.

Des dispositifs spécifiques tels que les appareils de dilatation (ADD) et des systèmes de fixation adaptés sont utilisés afin d'assurer la continuité et la sécurité de la voie.

IX.3.2.3. L'interface avec les équipements de l'ouvrage

L'interface voie-tablier comprend principalement des équipements de sécurité assurant la stabilité de la voie et la protection de l'infrastructure : systèmes de fixation des rails, dispositifs limitant les déplacements et les vibrations, ainsi que des accès sécurisés pour la maintenance et l'inspection. Ces éléments garantissent une exploitation sûre et fiable de l'ouvrage.



Figure IX-5 : Viaduc N°5 (PK11+790 au PK12+100) réalisé par INFRAWORKS 2023

IX.3.3. Tunnels

Dans le cadre de l'étude de notre projet, portant sur quatre tunnels, plusieurs interfaces techniques interviennent afin d'assurer la cohérence et le bon fonctionnement de l'ouvrage. Ces interfaces correspondent aux interactions entre les différents systèmes constituant le tunnel, garantissant ainsi une intégration optimale des aspects structurels, fonctionnels et d'exploitation.

IX.3.3.1. Etude de gabarit des tunnels

L'étude de gabarit des tunnels, selon les normes de l'UIC, définit les dimensions nécessaires pour assurer la sécurité des circulations. Elle distingue deux types de gabarit : le gabarit statique et le gabarit cinématique. Dans notre étude, le dimensionnement est basé sur le gabarit cinématique. Le gabarit est standard en alignement droit (UIC GC) et élargi en courbe pour tenir compte de ces effets.

- ⇒ **Le gabarit statique** : Le gabarit statique correspond à l'enveloppe géométrique du matériel roulant à l'arrêt ou en position théorique. Il ne tient pas compte des mouvements du train ni des effets dynamiques, et représente les dimensions maximales fixes du véhicule.
- ⇒ **Le gabarit cinématique** : Le gabarit cinématique est l'enveloppe réelle occupée par le train en mouvement. Il intègre les effets dynamiques tels que le roulis, le lacet, les oscillations et le déport en courbe, ainsi que les tolérances de voie. Il est donc plus grand que le gabarit statique et sert de base pour le dimensionnement des ouvrages selon les normes de l'UIC.

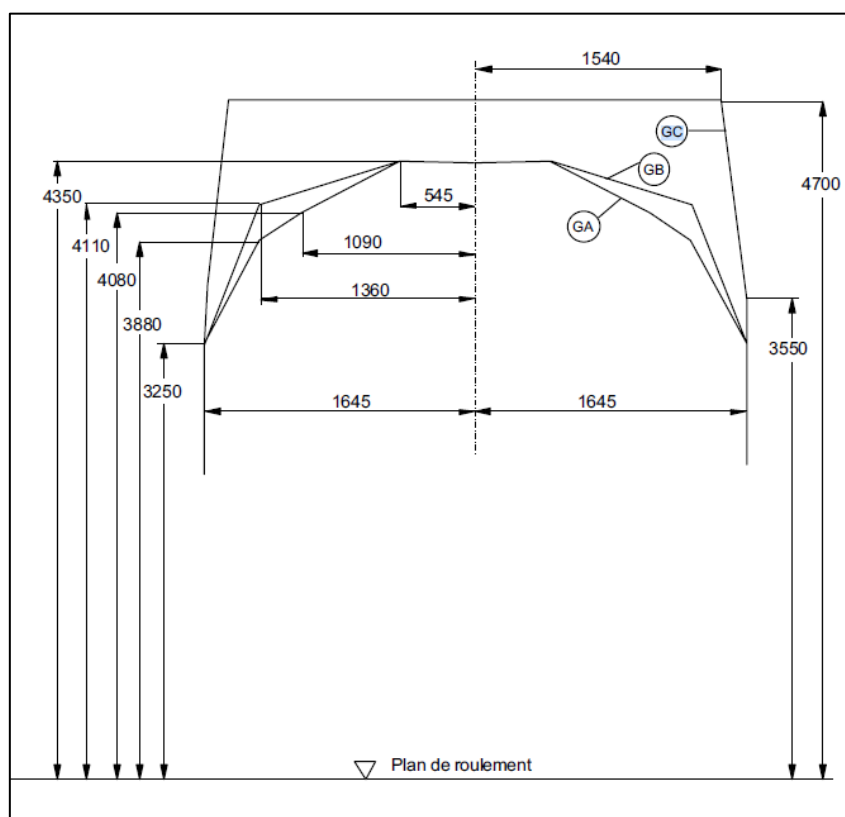


Figure IX-6 : Gabarit cinématique GC

IX.3.3.1.1. Le gabarit sur les alignements droits

Selon la norme UIC 506- Version 2008, le gabarit cinématique de type GC est définie comme suit et on travaille avec ce gabarit aussi sur les tunnels en alignement droite selon cette norme, le gabarit GC est mentionné à la figure suivante

Dans le tunnel, une hauteur de gabarit d'environ 7,70 m a été retenue sur la base des hypothèses suivantes :

- ⇒ 4,70 m correspondant au gabarit cinématique UIC (GC) du matériel roulant.
- ⇒ 2,50 m réservés à l'installation de la caténaire et à ses équipements.
- ⇒ 0,50 m de marge de sécurité pour assurer le dégagement et la circulation de l'air.

IX.3.3.1.2. Le gabarit sur les plaines du courbe

En alignement droit, le gabarit retenu est conservé sans modification. Cette hauteur est maintenue aussi bien en alignement droit qu'en courbe. Toutefois, en pleine courbe, le gabarit fait l'objet d'un élargissement latéral afin de tenir compte du déport du matériel roulant dû aux effets dynamiques. Cet élargissement, généralement compris entre 0,10 m et 0,40 m selon le rayon de courbure, permet de garantir les distances de sécurité entre le train et les parois du tunnel, conformément aux recommandations de l'UIC.

IX.3.3.2. Interface voie ferrée dans le tunnel

Cette interface concerne la superstructure ferroviaire installée dans le tunnel, qui peut être réalisée selon deux systèmes : la voie ballastée et la voie sur dalle en béton.

Dans les deux systèmes, l'entraxe des voies est de 4,20 m. Les vitesses d'exploitation prévues sont de 120 km/h pour les trains voyageurs et 80 km/h pour les trains de marchandises, garantissant la sécurité, la stabilité et le confort de circulation.

IX.3.3.2.1. Voie ballast

La voie ballast est constituée de rails 60E1 posés sur des traverses monobloc, avec une épaisseur minimale de ballast de 35 cm. Ce système permet une bonne élasticité, une meilleure répartition des charges et un amortissement efficace des efforts dynamiques.

Justification d'utilisation les traverses du monobloc

Dans les tunnels, les traverses monobloc précontraintes sont privilégiées en raison de leur meilleure stabilité géométrique et de leur rigidité supérieure. Elles assurent un meilleur maintien de l'écartement de la voie sous l'effet des charges dynamiques et offrent une continuité structurelle plus importante. Leur comportement homogène réduit les besoins d'entretien, particulièrement contraignants en milieu souterrain. Elles permettent également une meilleure interaction entre la voie et le radier en béton du tunnel face aux effets thermo-mécaniques, contribuant ainsi à la durabilité et à la stabilité de l'infrastructure.

IX.3.3.2.2. Voie sur dalle en béton

La voie sur dalle en béton repose directement sur une structure rigide en béton armé. Elle offre une excellente stabilité géométrique, une durabilité élevée et nécessite moins d'entretien par rapport à la voie ballast.

Dans le cadre du dimensionnement de la structure de voie sur dalle, une couche d'assise de 25 cm du type de béton JPCP (voir chapitre de dimensionnement de la couche d'assise) a été adoptée. Cette épaisseur permet d'assurer une bonne répartition des charges transmises par la voie vers la structure en béton, tout en garantissant la stabilité et la durabilité de l'ensemble. Ce dimensionnement a été défini en tenant compte des sollicitations dynamiques, des caractéristiques du trafic ferroviaire ainsi que des exigences de performance et de sécurité de l'infrastructure.

 Remarque

Il est important de noter que cette étude de dimensionnement de la voie sur dalle constitue une approche nouvelle, introduite à titre conceptuel et d'analyse comparative, tandis que le système de voie retenu et utilisé dans le projet reste la voie ballastée, conformément aux choix techniques et aux pratiques d'exploitation.

IX.3.3.3. Interface électrification

Cette interface regroupe l'ensemble des équipements d'alimentation électrique indispensables au fonctionnement des trains. Elle comprend la caténaire suspendue. Le système intègre également une alimentation électrique de secours ainsi que des dispositifs de sécurité permettant la coupure rapide de l'énergie en cas d'urgence. L'ensemble garantit une exploitation sûre, fiable et continue du tunnel.



Figure IX-7 : Caténaire suspendu

Remarque

Les coupes transversales des ouvrages d'art (viaducs et tunnels) avec tous les détails sont mentionnées dans les plans du profil en travers.



Figure IX-8 : Sortie du tunnel réalisé par INFRAWORKS 2023

IX.3.4. Le croisement avec rail

En général, le traitement des croisements dépend de la nature et du débit de la voie, ainsi que de la vitesse maximale de référence. Ainsi, chaque cas est étudié individuellement, avec trois solutions possibles envisagées :

-  **Passage supérieur.**
-  **Passage inférieur.**
-  **Passage à niveau.**

Dans notre tracé, la conception prévoit deux passage supérieur, localisés au PK05+540 et PK 19+350.

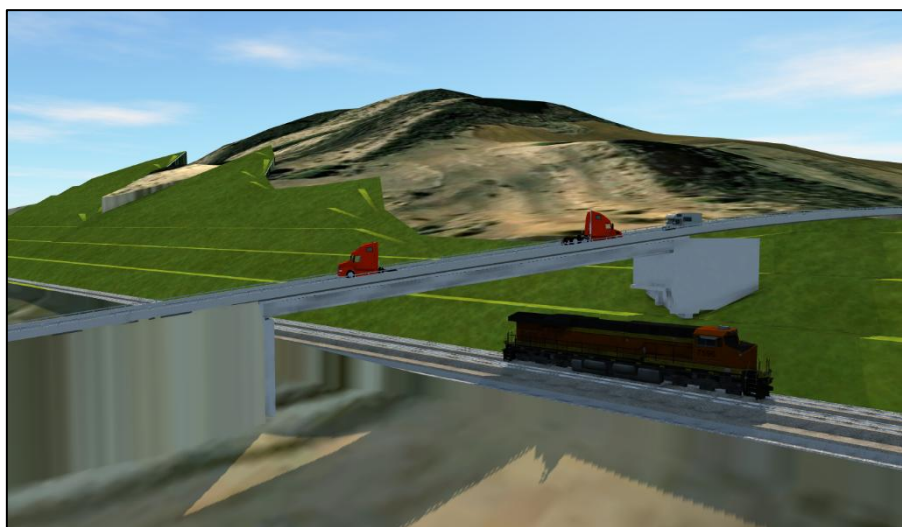
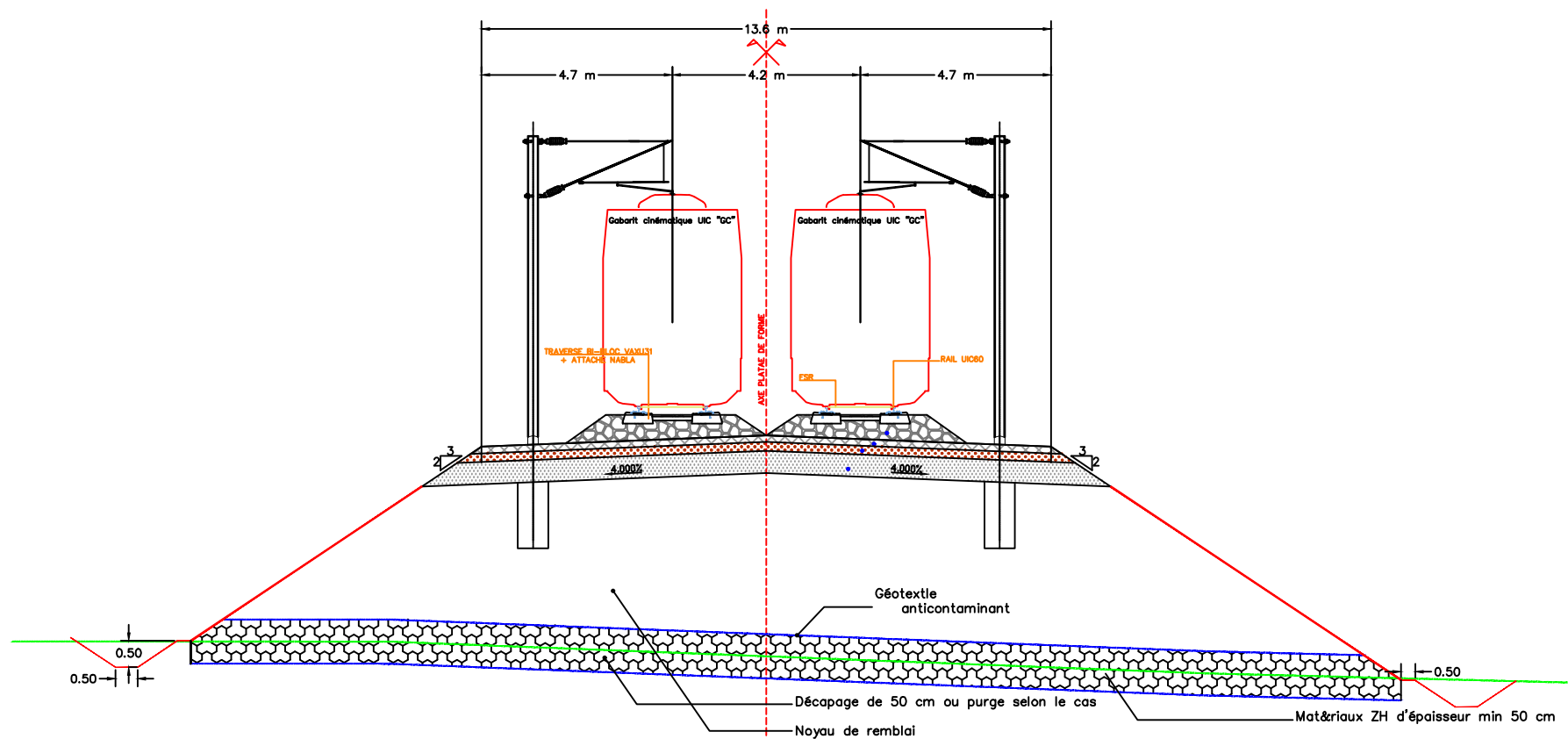


Figure IX-9 : Modélisation du passage supérieur au PK19+350 par INFRAWORKS 2023

PROFIL EN TRAVERS TYPE ZONE HUMIDE ECH 1/150



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

PROJET DE FIN D'ETUDES

Etude en APD du Rectification et/ou dédoublement du tracé de la ligne minière Est section centre : BOUCHEGOUF-OUED KEBRIT sur le tronçon PK00+000 au PK20+000 avec conception de la gare de SOUKAHRAS

Réalisé par

BOUGOUTTAYA .
Mahmoud
MEKIOUI . Chawki
Ayoub

Encadré par

Mr. RAMDANE
Ismail

Echelle

1/150

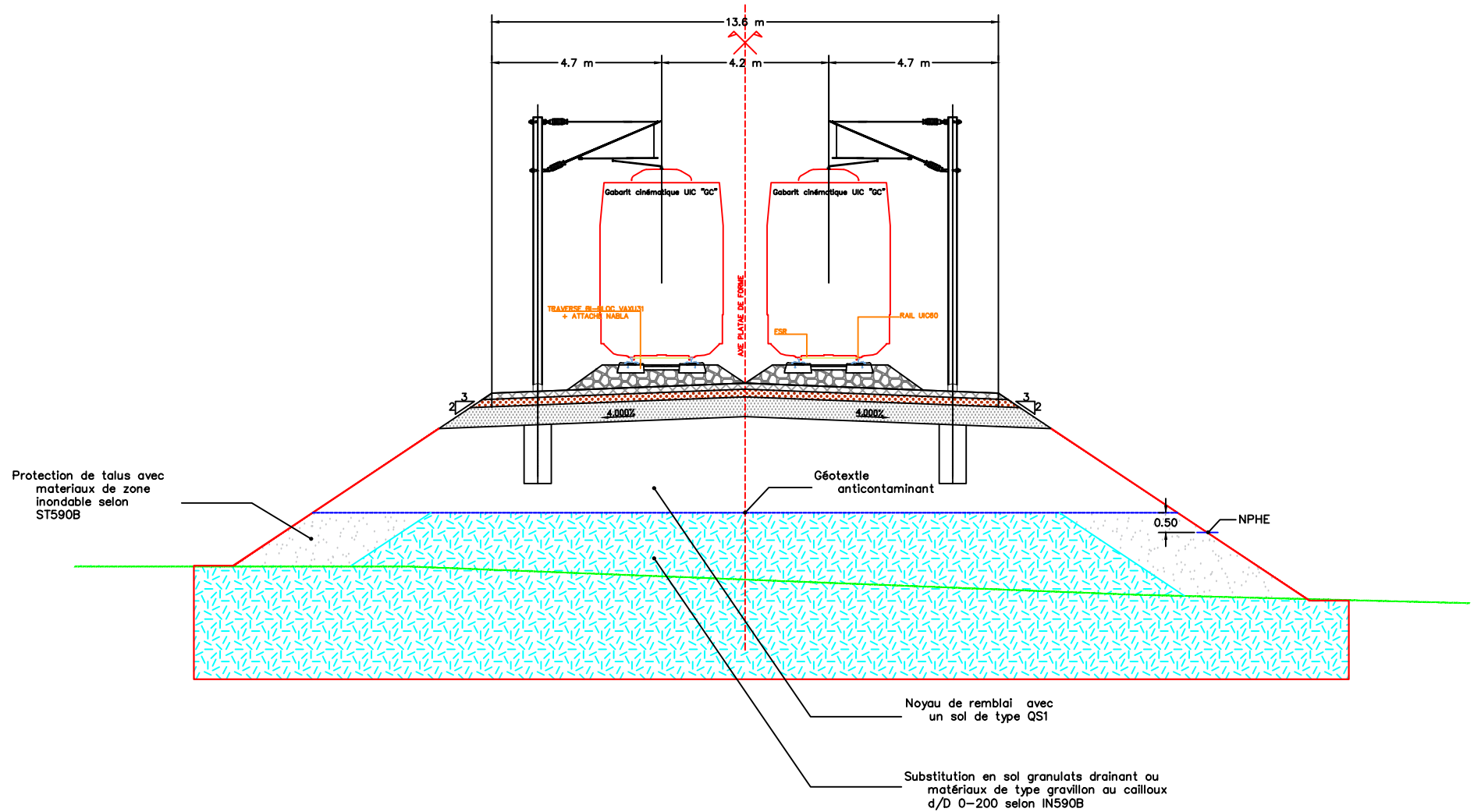
Nom de la Planche

Profil en travers
type en zone humide

Année universitaire

2025 / 2026

PROFIL EN TRAVERS TYPE ZONE INONDABLE ECH 1/150



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

PROJET DE FIN D'ETUDES

Etude en APD du Rectification et/ou dédoublement du tracé de la ligne minière Est section centre : BOUCHEGOUF-OUED KEBRIT sur le tronçon PK00+000 au PK20+000 avec conception de la gare de SOUKAHRAS

Réalisé par

BOUGOUTTAYA .
Mahmoud
MEKIOUI . Chawki
Ayoub

Encadré par

Mr. RAMDANE
Ismail

Echelle

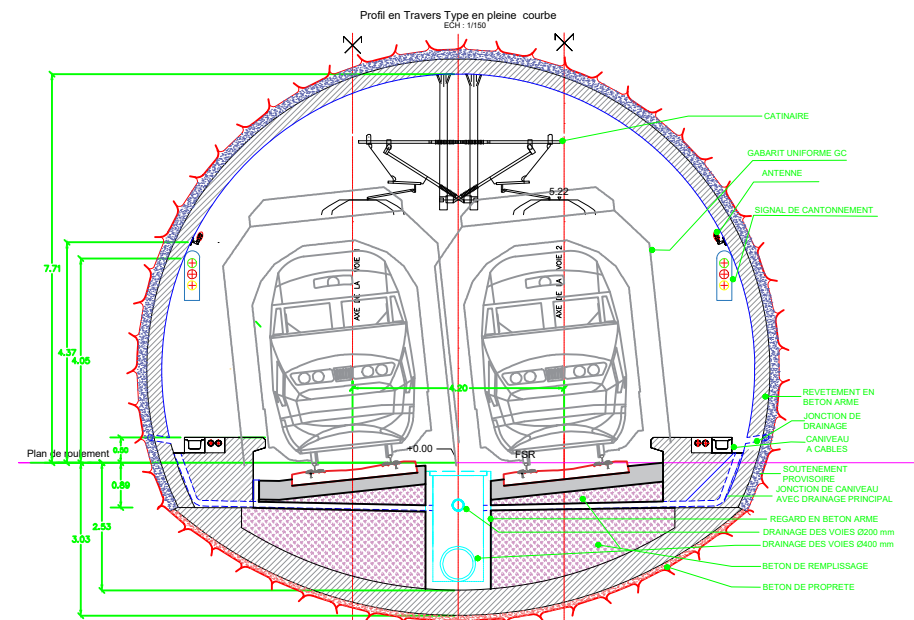
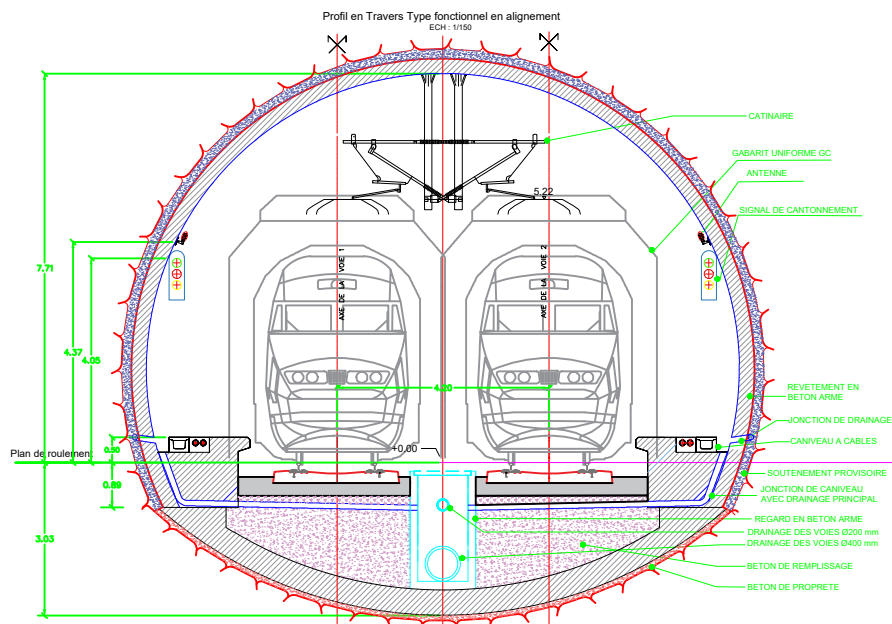
1/150

Nom de la Planche

Profil en travers
type zone inondable

Année universitaire

2025 / 2026



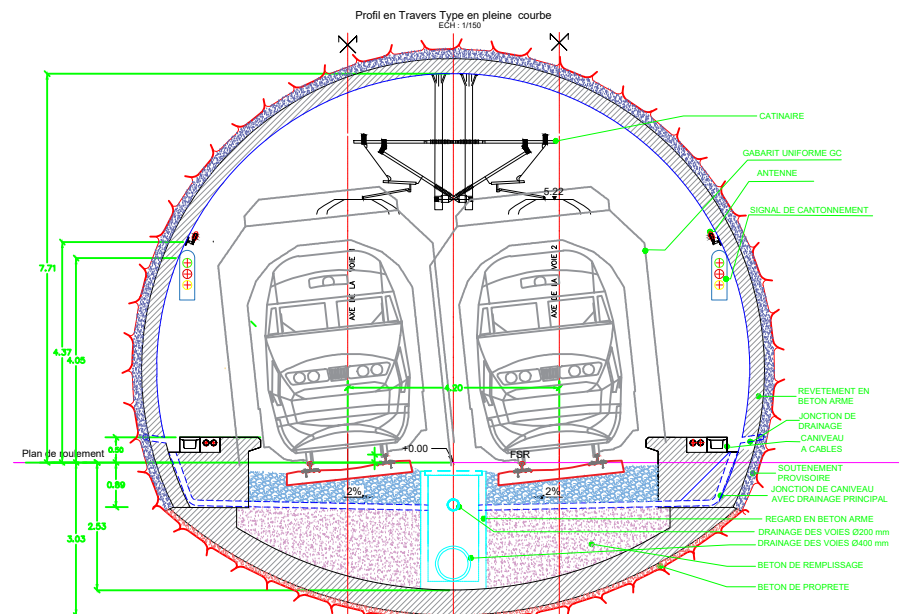
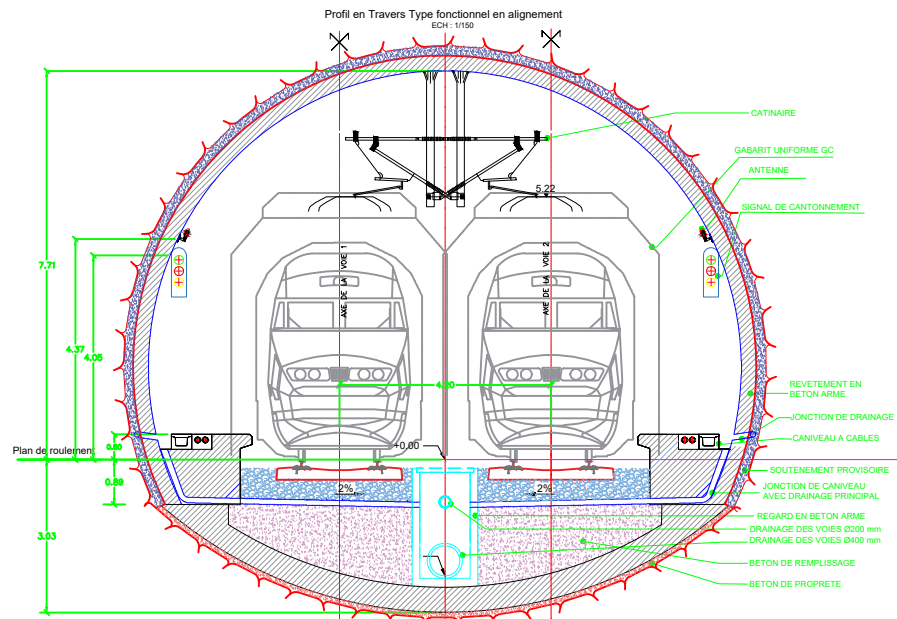


PLATE FORME A DOUBLE VOIE (Pont poutre)

Echelle: 1/150

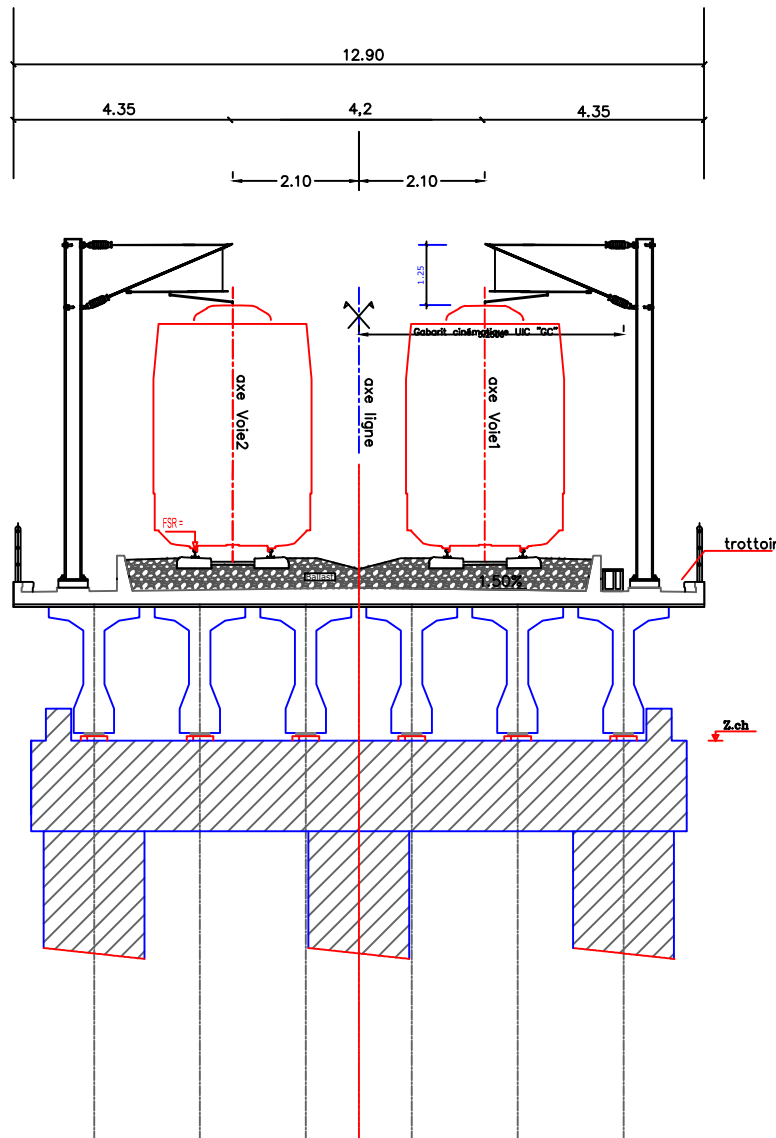
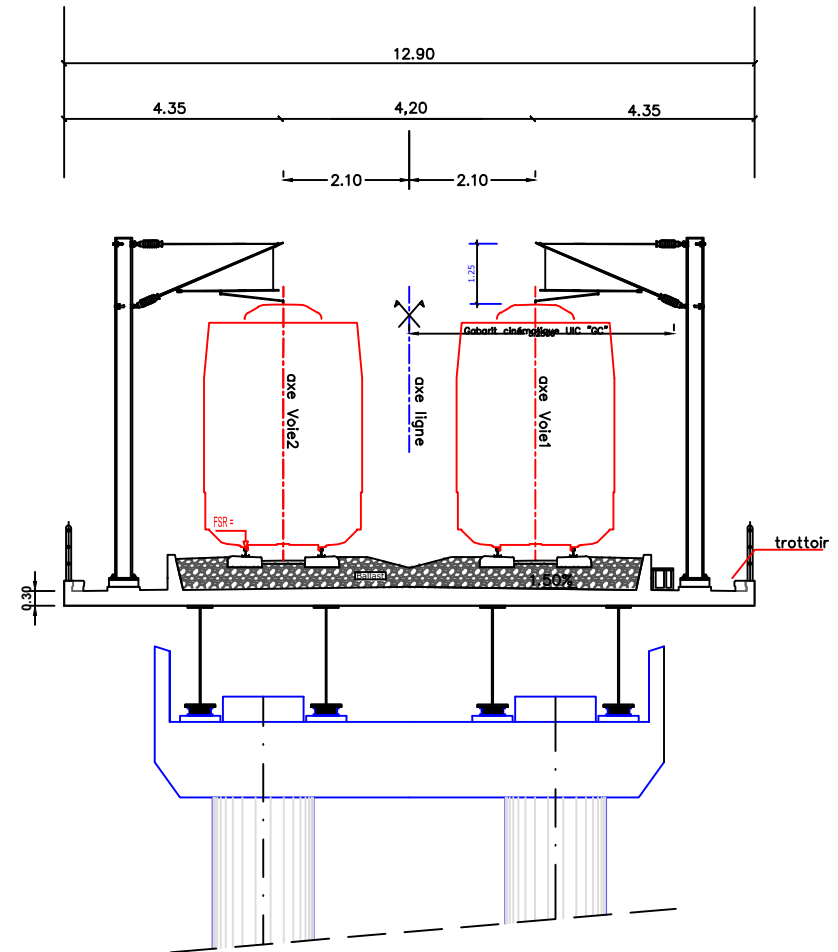
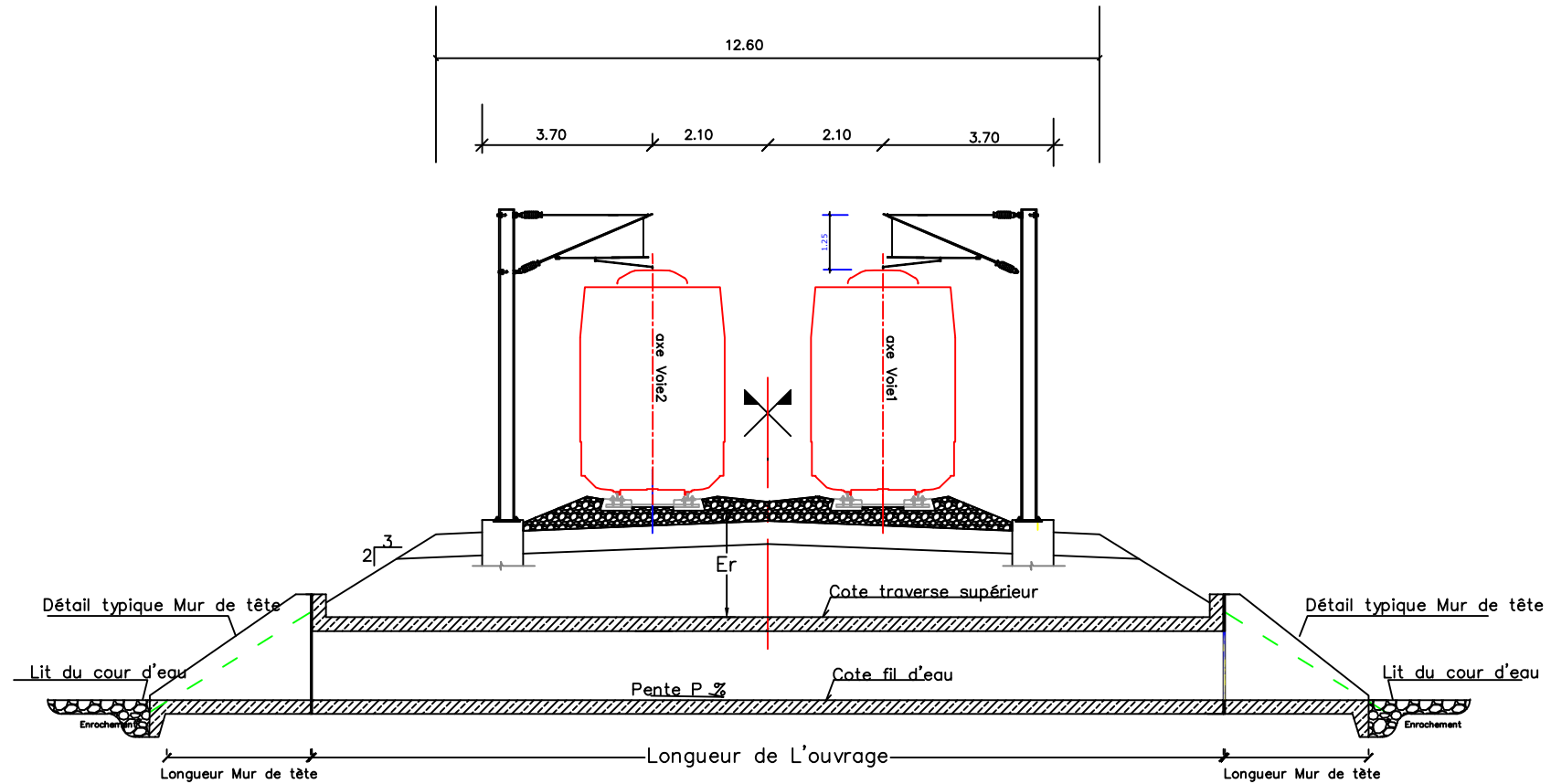


PLATE FORME A DOUBLE VOIE (Pont mixte)

Echelle: 1/150



AXE Ouvrage HYDRAULIQUE
Er :remblai variable
Coupe Longitudinale echelle:1/150



IX.3.5. Les ouvrages d'art du projet

Le tableau suivant (**Tableau IX-2**) montre mes grands ouvrages d'art dans notre tracé :

Tableau IX-2 : Liste des ouvrages

Type de l'ouvrage		PK début	PK fin	Longueur (m)
Viaducs	N°01	04+630	04+800	170
	N°02	06+344	09+100	2756
	N°03	09+375	09+780	405
	N°04	09+825	11+560	1735
	N°05	11+800	12+120	320
	N°06	15+240	16+825	1585
	N°07	18+130	19+230	1100
Tunnels	N°01	03+025	03+850	825
	N°02	03+975	04+610	635
	N°03	04+810	05+760	950
	N°04	12+130	12+960	830
	N°05	13+150	15+180	2030
Totale (Km)				13.341

IX.4. Conclusion

En conclusion de ce chapitre, il apparaît clairement que les travaux de terrassement et la réalisation des ouvrages d'art jouent un rôle essentiel dans la réussite d'un projet ferroviaire, nécessitant une grande rigueur ainsi qu'une coordination étroite entre les différents intervenants.

Le respect strict de ces étapes garantit la mise en place d'un réseau ferroviaire sûr, performant et durable, tout en contribuant, à travers la qualité des réalisations, au développement et au progrès de la société moderne.

CHAPITRE X

CONCEPTION DE LA GARE

X. CONCEPTION DE LA GARE

X.1. Introduction

Une gare bien conçue ne se limite pas à un simple point de départ ou d'arrivée, mais constitue un véritable pôle d'échanges reliant différents modes de transport, villes et usagers. Elle doit répondre aux besoins des voyageurs en offrant confort, accessibilité, fonctionnalité et durabilité. Dans un projet ferroviaire, la gare représente un espace public dynamique où se croisent les flux et s'organisent les déplacements. Sa conception nécessite une approche globale intégrant les aspects techniques, opérationnels et urbains. Ainsi, ce chapitre vise à analyser les principes essentiels permettant de concevoir des gares ferroviaires performantes et adaptées aux exigences modernes.

X.2. Les types des gares

On distingue plusieurs types des gares :

- ⇒ Gare de voyageur.
- ⇒ Gare marchandise.
- ⇒ Gare mixte.
- ⇒ Gare de croisement.
- ⇒ Gare de dépassement.

Remarque

D'après notre étude, basée sur le plan de transport de la ligne minière Est, la gare de Souk-Ahras est classée comme une gare mixte.

X.3. L'emplacement de la gare

La gare mixte de SOUK AHRAS se situe du PK00+000 au PK01+600, et dans la figure suivante (**Figure X-1**) l'emplacement de cette gare.



Figure X-1 : Localisation de la gare de SOUK-AHRAS



Figure X-2 : Zone d'implantation de la future gare de SOUK-AHRAS

X.4. Conditions de conception des gares

La conception d'une gare mixte repose sur une bonne intégration urbaine, une séparation claire des flux voyageurs–marchandises et une organisation efficace du plan de voies pour assurer une exploitation fluide et sécurisée. Elle nécessite aussi une accessibilité adaptée via les réseaux routiers, des infrastructures spécifiques pour les deux types de trafic, ainsi que la prise en compte des réserves foncières et des conditions d'exploitation afin de permettre des extensions futures et garantir un bon fonctionnement.

X.4.1. Installation de la gare pour les voyageurs

Dans une gare ferroviaire, les installations de la base d'une gare de voyageurs sont :

- ⇒ **Le bâtiment de voyageurs (B.V)** : c'est un espace réservé aux voyageurs dans lequel on peut trouver une salle d'attente, guichet de billet, poste de sécurité, foyer...etc.
- ⇒ **Les bâtiments à usages divers (B.U.D)** : c'est un espace de service réservé aux agents de chemins de fer.
- ⇒ **Quais** : c'est une bande parallèle à la voie ferrée qui permet l'accès aux trains.
- ⇒ **Abris de quais** : c'est une installation sur le quai qui a pour but de protéger les voyageurs des intempéries.
- ⇒ **Les passages sous terrain et les passerelles** : ils sont construits dans les gares afin de permettre aux voyageurs de traverser la voie et de changer le quai en pleine sécurité.

X.4.2. Installation d'une gare marchandises

Les installations de la base d'une gare marchandises sont :

- ⇒ Le bâtiment de service (B.S) : pour accomplir les formalités de l'acte commercial.
- ⇒ Des cours de débords pour embarquement et débarquement des marchandises.
- ⇒ Quai de débord.
- ⇒ Halle de stockage.
- ⇒ Parking pour stationnement des véhicules.

X.5. Caractéristiques géométriques de la gare

X.5.1. Déclivité dans la gare

La déclivité est à limiter en fonction des activités qui y sont prévues. Dans notre projet, la déclivité est de 00 ‰ afin d'éviter tout déplacement possible des trains.

X.5.2. Entraxe des voies

Pour notre gare, l'entraxe des voies est variable selon le type et organisation des voies, le détail pour l'entraxe des voies est mentionné dans le tableau suivant :

Tableau X-1 : L'entraxes des voies pour la gare

Le type des voies	Entraxe (m)	Justification
Les voies pour les trains voyageurs	5.0	Faciliter les opérations d'exploitation et de maintenance, ainsi que d'améliorer la sécurité et le confort des voyageurs lors des montées et descentes des trains...
Les voies principales	5.0	Permet d'améliorer les conditions de sécurité lors du croisement ou du dépassement des trains à vitesse réduite, de faciliter les opérations d'exploitation et de maintenance...
La voie du marchandises/ voie principale	10	Afin de respecter les règles d'implantation des appareils de voie (ADV), d'assurer les dégagements de sécurité nécessaires et de faciliter les opérations d'exploitation et de maintenance.

X.6. Appareil de voies et configuration ferroviaire

L'exploitation des voies ferrées nécessite des dispositifs permettant l'interconnexion et la déviation des itinéraires, appelés appareils de voie (ADV).

Un appareil de voie est un ensemble mécanique assurant le guidage des trains d'une voie à une autre tout en maintenant la continuité du roulement. Il est généralement constitué de trois éléments principaux : l'aiguillage, la partie intermédiaire et le cœur de croisement.

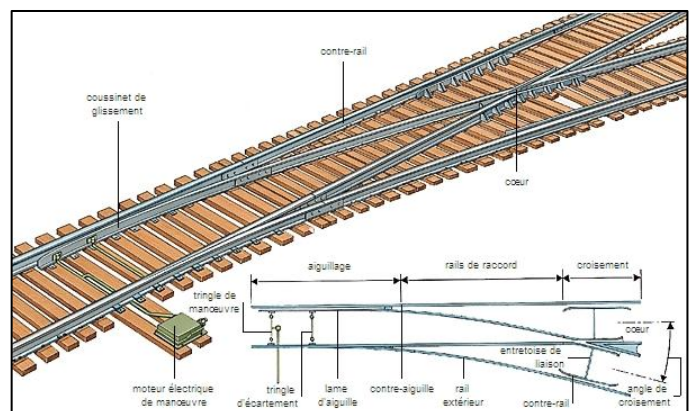


Figure X-3 : Schéma d'un appareil de voie

X.6.1. Choix de l'appareil de voie

Le choix de l'appareil de voie dépend selon le type de voie, la vitesse de déviation, le type d'entrée et la sortie de la voie..., le tableau suivant montre les types de rail utilisé dans notre gare (**Tableau X-2**) :

Tableau X-2 : Les types des ADV utilisées pour le projet

Type de l'appareil	Vitesse de déviation (km/h)	Cas d'application
UIC 60 E1 300- 1:9	50	Entrée et sortie de voie de quai utilisés par des trains voyageurs, faisceau de transfert de gare de marchandises, circulation du la gare marchandises
UIC 60 E1 500- 1:12	70	Entrée et sortie de voie de quai des trains banlieue ou voyageur, entrée et sortie voie voyageurs et marchandises, communication des voies de ligne de bifurcation d'une voie de ligne

X.6.2. Conditions d'implantation des ADV

Les règles d'implantation selon la norme SNTF sont les suivantes :

X.6.2.1. Condition générale

Les appareils de voie seront implantés en déclivité constante. Il en sera de même des communications.

D'autre part, dans les zones situées à proximité d'un ouvrage d'art, les appareils de voie devront être situés à des distances minimales qui sont fonction de la longueur L de celui-ci :

Tableau X-3 : Les conditions des longueurs à proximité d'un OA

Distance minimale (m)	Longueur de l'appareil (m)
≥ 20	≤ 30
≥ 50	$30 < L \leq 90$
≥ 50	$L > 90$ m depuis le côté opposé à l'appareil de dilatation

X.6.2.1.1. En tracé en plan

L'implantation des appareils de voie s'effectuera conformément aux longueurs minimales du tracé retenues ci-dessous :

⇒ **En pointe**

La longueur minimale d'alignement (L_1) devra être égale à $V_d/2$, V_d étant la vitesse exprimée en km/h de franchissement en voie déviée.

⇒ **En talon de la branche déviée**

- Si la sortie d'appareil est en alignement, la longueur minimale d'alignement à respecter devra être égale à $V_d/2$.
- Si la sortie d'appareil est en courbe :

⇒ $V_d < 100$: il conviendra de réserver un alignement de longueur minimale égale à $V_d/2$ ou de prolonger la courbe de l'appareil suivie elle-même d'un raccordement progressif.

⇒ $100 \leq V_d \leq 160$: il est conseillé de prolonger la courbe de la voie déviée par un raccordement progressif dans le même sens et ce pour toute situation nouvelle.

⇒ $V_d \geq 160$: la condition ci-dessus est obligatoire. Quelle que soit V_d , la longueur des raccordements sera calculée afin d'obtenir une variation maximale d'insuffisance de dévers $\Delta I/\Delta t$ de 75 mm/s (valeur normale) et 90 mm/s (valeur exceptionnelle).

⇒ **En talon de la voie directe**

La longueur minimale d'alignement L_2 , à réserver, doit être supérieure à 50m.

Dans le cas de deux appareils disposés pointe à pointe, la valeur minimale pour « L » doit tenir compte :

- Des contraintes du tracé : $L \geq V_d/2$ (V_d étant la vitesse en voie déviée de l'appareil le moins performant),
- Des contraintes de signalisation et de caténaire, qui sont fonction des éléments et systèmes définis pour ces domaines.

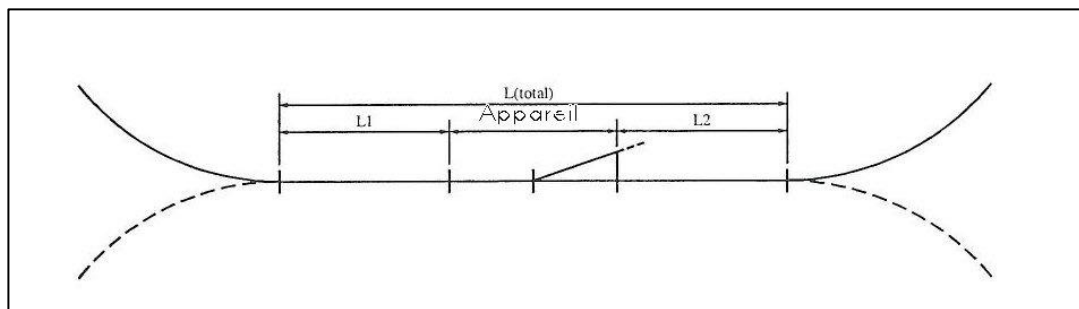


Figure X-4 : Schéma illustratif pour les règles d'implantation des ADV

X.6.2.1.2. En profil en long

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

X.6.3. Le garage franc

La zone délimitée par le garage franc indique la portion de la voie réservée aux véhicules en stationnement. Il est positionné par rapport au cœur de l'appareil de voie, à une distance GF, afin d'assurer un positionnement adéquat de l'élément.

$$GF = 3,57 \times N + 1$$

Avec $N = \tan(\alpha)$ qui varie selon l'ouverture de l'appareil de la voie.

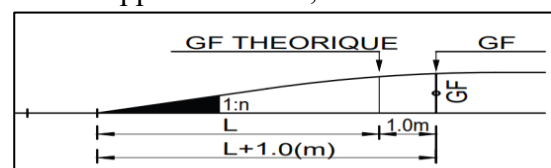


Figure X-5 : Schéma illustratif d'un garage franc

Le garage franc pour les types des appareils des voies utilisées pour le projet est mentionné dans le tableau suivant (**Tableau X-4**).

Tableau X-4 : Les valeurs de garage franc

Type de l'appareil de voie	Garage franc (m)
UIC 60 E1 300- 1:9	33.13
UIC 60 E1 500- 1:12	43.84

X.6.4. Marge de glissement

Selon UIC 741 Les longueurs de la marge de glissement sont définies selon la vitesse de la ligne, comme à l'aval des signaux de protection, des signaux d'entrée, des signaux intermédiaires ou de sortie :

$L_g = 200 \text{ m}$ pour une vitesse supérieur à 60 km/h.

$L_g = 100 \text{ m}$ pour une vitesse supérieur à 40 km/h et inférieur à 60 km/h.

$L_g = 50 \text{ m}$ pour une vitesse inférieur à 60 km/h.

Donc pour notre projet, la vitesse est supérieure à 60 km/h, le marge de glissement est 200 mètres.

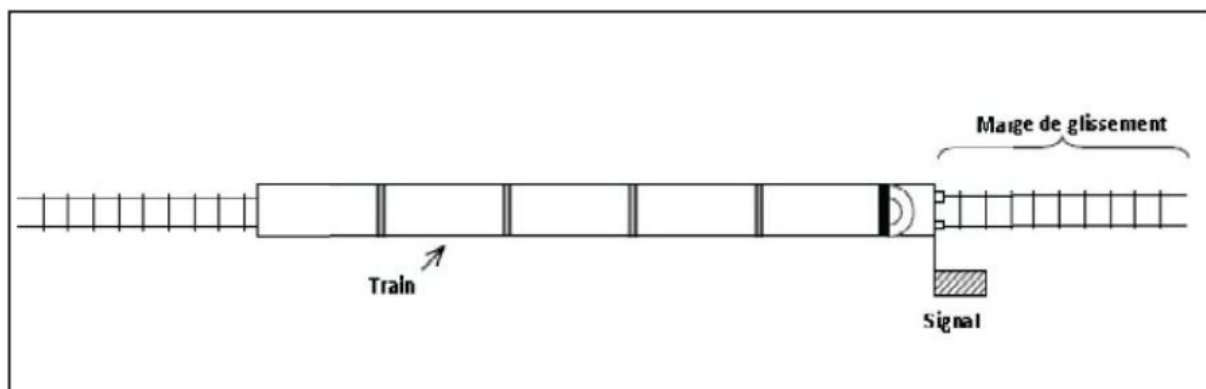


Figure X-6 : Schématisation de la marge de glissement

X.6.5. Longueur utile

Il est défini comme étant la distance entre deux garages francs, permettant au train de se garer sur la voie de dépassement sans entraver la circulation sur la voie principale ou les autres voies de dépassement adjacentes.

Les valeurs de la longueur utile sont définies dans la norme SNTF relative à l'aménagement des gares et au trace des voies. Selon cette norme :

⇒ Les trains de marchandise sur la voie principale, elle est de 870 m

⇒ La longueur utile minimale pour les trains voyageurs est de 426 m.

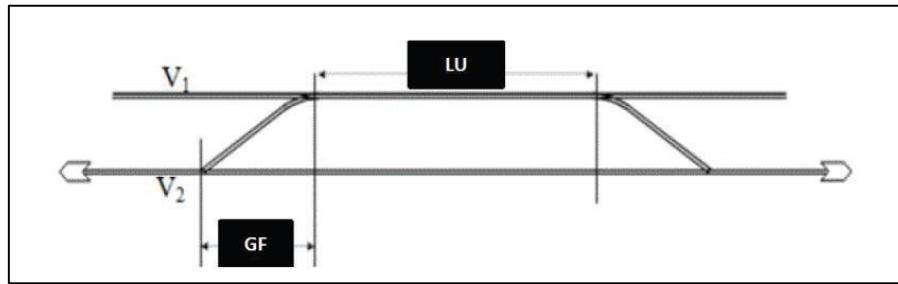


Figure X-7 : Schéma de la longueur utile

X.6.6. Les heurtoirs

Matérialise la fin d'une voie de garage ou de sécurité. Les heurtoirs sont placés aux extrémités des voies pour éviter que les véhicules en mouvement continuent leur chemin en dehors de la voie, conçue pour absorber l'énergie cinétique des trains qui les heurtent par l'intermédiaire des tampons.



Figure X-8 : Les heurtoirs

X.7. Aménagement de la gare de Souk-Ahras

X.7.1. Quai

X.7.1.1. Longueur du quai

La longueur du quai varie selon le type de gare et le service assuré. Elle est généralement de 450 m pour les gares de grandes lignes, de 350 m pour les services régionaux et d'environ 225 m pour les lignes de banlieue.

X.7.1.2. Largeur du quai

La largeur du quai dépend de sa position, qu'il soit latéral (extérieur) ou central (intermédiaire). Les quais extérieurs doivent avoir une largeur supérieure à 6 mètres, tandis que les quais intermédiaires doivent présenter une largeur supérieure à 8 mètres.

X.7.1.3. Hauteur du quai

La hauteur nominale du bord du quai devra être de 550 mm ou de 760 mm au-dessus de la table de roulement selon le type de matériel roulant qui est susceptible de s'arrêter à ce quai.

- Plus grand que 760 mm → quais dits hauts.
- Plus petit que 550 mm → quais dits bas.

X.7.1.4. Distance par rapport l'axe de voie

Pour les bordures de quai implantées à la hauteur nominale de 550 mm, la distance nominale à l'axe de la voie est fixée à : $L \text{ (mm)} = 1650 + S$

La valeur de S est donnée comme suit :

$$S = \frac{3750}{R} + \frac{I - 1435}{2}$$

Avec R c'est le rayon de voie en mètre et I c'est l'écartement de la voie en millimètre.

Dans notre projet les quais de gare sont implantés dans une zone sans rayon (alignement droit), $S=0$, alors la distance par rapport l'axe de voie est de 1.65 mètres

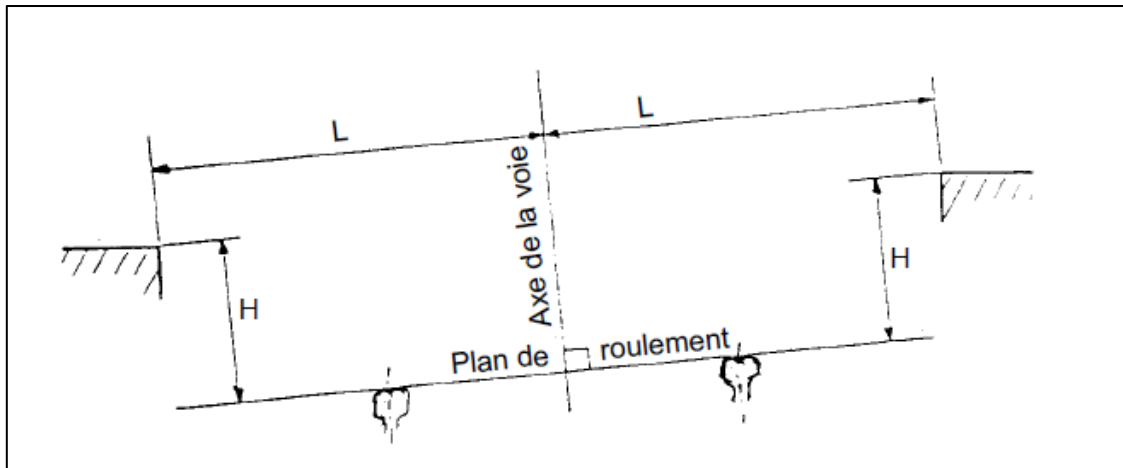


Figure X-9 : Hauteur de quai et la distance par rapport à l'axe de quai

X.7.1.5. Application sur notre projet

Notre gare est constituée de deux quais A (extérieur) et B (intermédiaire), le tableau suivant (**Tableau X-5**) mentionne toutes les caractéristiques de deux quais

Tableau X-5 : Les caractéristiques des quais

Quais	PK début	PK fin	Longueur	Largeur	Hauteur	Distance à l'axe	Entre axe des quais
A	00+605	00+855	250 mètres	8 mètres	55 cm	1652.5 mm	17.3 mètres
B				10 mètres			

X.7.2. Passage entre les quais

Afin d'assurer la circulation sécurisée et fluide des voyageurs entre les différents quais de la gare, il est prévu la réalisation d'un passage souterrain reliant l'ensemble des quais. Ce passage relie tous les quais et comprend des escaliers suffisamment larges pour permettre la gestion des flux d'arrivée et de départ simultanément, sans encombre.

Un ascenseur est également prévu pour faciliter l'accès des personnes à mobilité réduite.



Figure X-10 : Passage souterrain

Remarque

Pour les passages souterrains, leur implantation est définie dans le profil en travers des voies au niveau de la gare.

X.7.3. Accès routier et organisation de la gare

L'organisation des accès routiers et des échanges multimodaux joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement de la gare. Elle permet d'assurer une accessibilité fluide et sécurisée pour les différents usagers et de faciliter l'interconnexion entre les modes de transport.

X.7.3.1. Accès routier à la gare

L'accès routier à la gare est assuré par la route CW19, qui constitue l'axe principal de liaison entre la gare et le réseau routier régional. Cette connexion permet de relier directement la gare aux différentes zones urbaines et aux localités environnantes, garantissant ainsi une accessibilité aisée pour les voyageurs. L'aménagement de cet accès est conçu de manière à assurer une circulation fluide et sécurisée des véhicules, tout en facilitant l'entrée et la sortie de la gare sans perturber le trafic sur la CW19.

X.7.3.2. Organisation du stationnement (parking)

Le stationnement de la gare est assuré par un parking réservé aux véhicules des usagers, situé à proximité du bâtiment voyageurs. Il permet de faciliter l'accès des voyageurs et d'assurer un déplacement piéton sécurisé. Sa capacité est adaptée au trafic prévu afin d'éviter la saturation. L'organisation du parking garantit également une bonne fluidité de circulation aux abords de la gare.

X.7.3.3. Aire d'arrêt des bus

Dans notre cas, la gare est située à une distance peu loin de la ville de Souk-Ahras, ce qui nécessite une bonne organisation du service de transport par bus. Une aire d'arrêt est prévue pour assurer le transport régulier des voyageurs entre la ville et la gare.

Cette disposition garantit une liaison efficace et une continuité du service entre le réseau urbain et le transport ferroviaire.

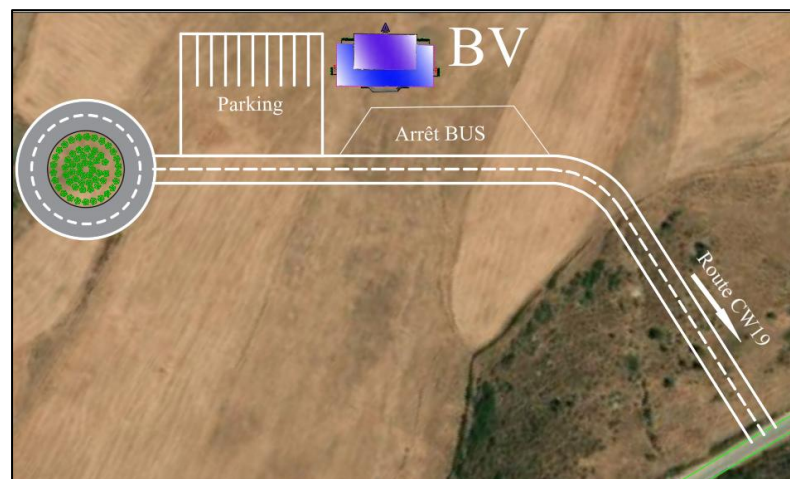


Figure X-11 : Accès routier et organisation de la gare

X.8. Description de la gare de Souk-Ahras

La gare de Souk-Ahras s'étend du PK 00+000 au PK 01+652, soit une longueur totale de 1 652 m. Elle est composée de deux voies principales (V1 et V2), de deux voies de stationnement voyageurs (V4 et V6), d'une voie de stationnement marchandises (V3), ainsi que d'une voie de garage terminée par un heurtoir, présentant une longueur utile de 300 m. Les longueurs utiles de chaque voie sont présentées dans le tableau suivant (**Tableau X-6**).

Tableau X-6 : Les longueurs utiles des voies

Voie	Longueur utile (m)
V1	932
V2	758
V3	930
V4	696
V6	699
V3T1	300

X.9. Assainissement de la gare

L'assainissement de la gare est un élément essentiel de l'aménagement, permettant la collecte et l'évacuation des eaux pluviales et usées. Il évite la stagnation de l'eau, protège les ouvrages ferroviaires et garantit la durabilité de l'infrastructure ainsi que la sécurité des usagers

X.9.1. Assainissement transversal

Pour garantir un drainage efficace des eaux pluviales au niveau de la gare, les quais sont conçus avec une pente longitudinale en toit de 2 %, associée à une inclinaison transversale de 4 % sur les plates-formes, afin d'assurer un écoulement gravitaire optimal vers les dispositifs de collecte.

X.9.2. Assainissement longitudinal

Pour assurer la collecte des eaux de ruissellement infiltrées dans le ballast et la plate-forme, des drains longitudinaux présentant une pente de 4‰ sont mis en place. Ces dispositifs permettent de capter ces eaux et de les acheminer vers le réseau d'assainissement à travers des regards de visite.

Le système de drainage est constitué de fossés, de drains et de collecteurs qui assurent l'acheminement des eaux vers les ouvrages hydrauliques ou les exutoires naturels existants.

X.9.3. Drainage

Dans le cadre de l'assainissement de la plateforme, un système de drainage a été mis en place à l'aide de conduites en PVC perforé de diamètre 300 mm, assurant l'évacuation des eaux

pluviales entre les voies ferrées. Les perforations situées sur la partie supérieure des conduites facilitent l'infiltration et la collecte des eaux. Le dispositif est complété par des regards de visite implantés tous les 50 m le long de la tranchée drainante, permettant l'inspection et l'entretien du réseau. Enfin, les eaux collectées sont acheminées vers un exutoire naturel via des collecteurs en béton armé.

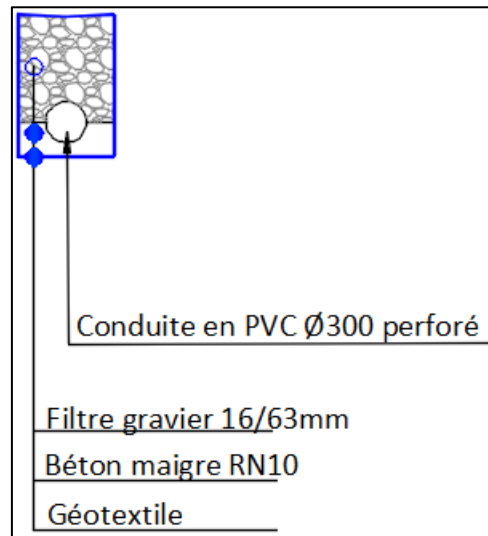


Figure X-12 : Ouvrage de drainage

X.10. Conclusion

La gare mixte de Souk-Ahras est un nœud ferroviaire stratégique assurant le transport des voyageurs et du fret dans des conditions optimisées, avec une exploitation fiable et performante. Elle dispose d'infrastructures modernes garantissant la sécurité et la fluidité des circulations. Les projets de modernisation en cours visent à renforcer sa capacité et son rôle dans le développement régional.

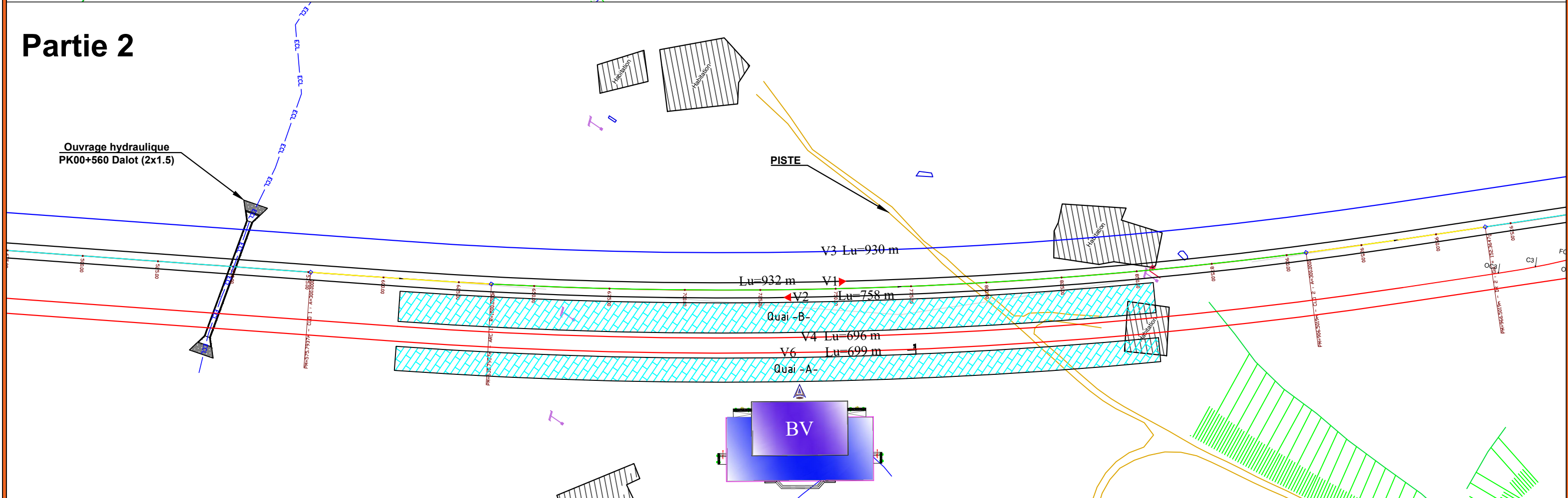
Remarque

Les données d'implantation de la gare de Souk-Ahras sont définies sur (ANNEXE E).

Partie 1

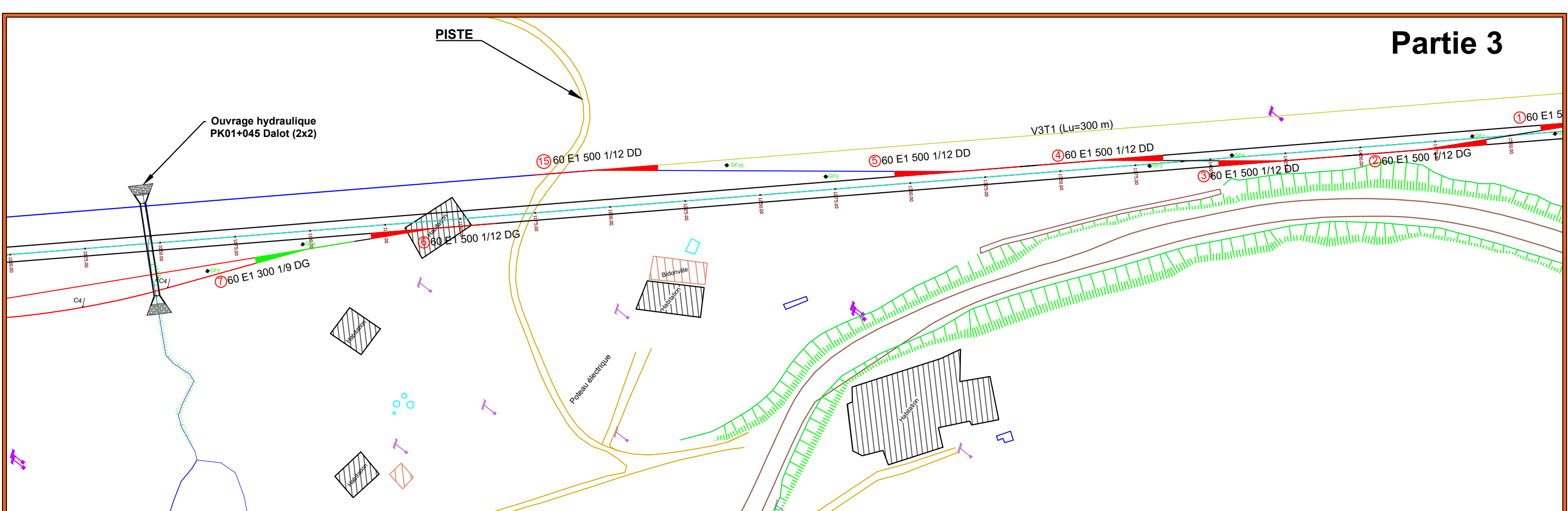


Partie 2

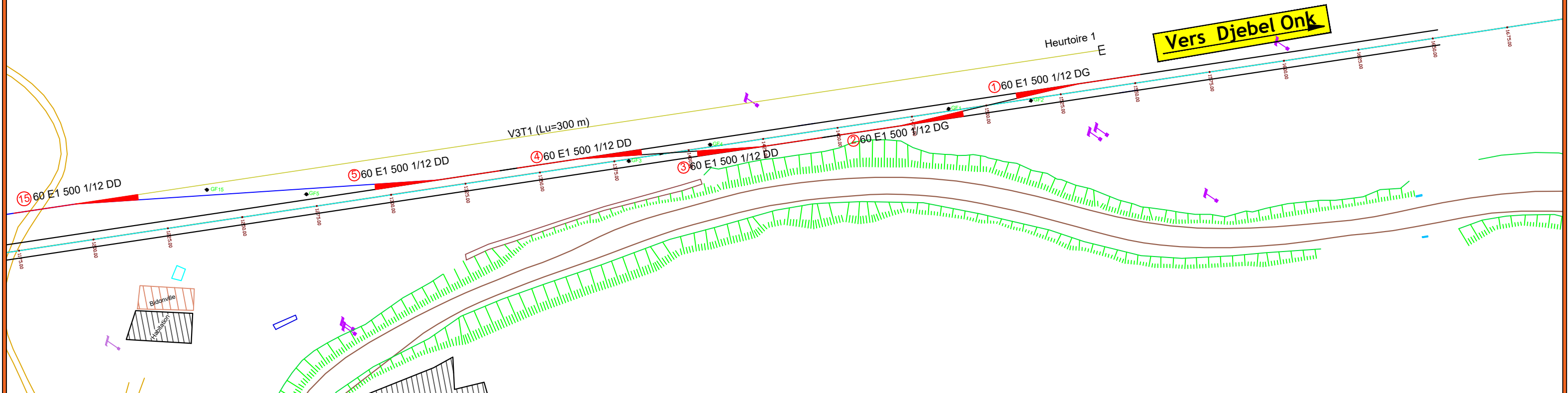


 ENSTP الجامعة الوطنية العليا للهندسة Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics National School of Built and Ground Works Engineering	Adresse : Rue Sidi Garidi b.p. 32 Vieux Kouba -16051. Alger Fax : (023) 70 19 38 Tel : (023) 70 19 04	Site web : www.enstp.edu.dz E-mail : enstp@enstp.edu.dz	PROJET DE FIN D'ETUDES		Réalisé par	Encadré par	Echelle	Nom du Planche	Année universitaire
			Etude en APD de dédoublement et/ou rectification du tracé pour augmenter la capacité de la ligne ferroviaire minière EST section centre (BOUCHEGOUF-OUED EL KEBRIT) sur le tronçon du PK00+000 au PK20+000 avec la conception du la gare de Souk-Ahras		BOUGOUTTAYA Mahmoud MEKIOUI Chawki Ayoub	Mr. RAMDANE Ismail	1/1250	Tracé en plan du la gare du Souk-Ahras du PK00+000 au PK01+000	2025/2026

Partie 3



Partie 4



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

Etude en APD de dédoublement et/ou rectification du tracé pour augmenter la capacité de la ligne ferroviaire minière EST section centre (BOUCHEGOUF-OUED EL KEBRIT) sur le tronçon du PK00+000 au PK20+000 avec la conception du la gare de SOUKAHRAS

Réalisé par

BOUGOUTTAYA
Mahmoud
MEKIOUI Chawki
Ayoub

Encadré par

Mr.
RAMDANE Ismail

Echelle

1/1250

Nom du Planche	
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17
18	18
19	19
20	20
21	21
22	22
23	23
24	24
25	25
26	26
27	27
28	28
29	29
30	30
31	31
32	32
33	33
34	34
35	35
36	36
37	37
38	38
39	39
40	40
41	41
42	42
43	43
44	44
45	45
46	46
47	47
48	48
49	49
50	50
51	51
52	52
53	53
54	54
55	55
56	56
57	57
58	58
59	59
60	60
61	61
62	62
63	63
64	64
65	65
66	66
67	67
68	68
69	69
70	70
71	71
72	72
73	73
74	74
75	75
76	76
77	77
78	78
79	79
80	80
81	81
82	82
83	83
84	84
85	85
86	86
87	87
88	88
89	89
90	90
91	91
92	92
93	93
94	94
95	95
96	96
97	97
98	98
99	99
100	100

Tracé en plan du la gare du
Souk-Ahras du PK01+000
au PK01+652

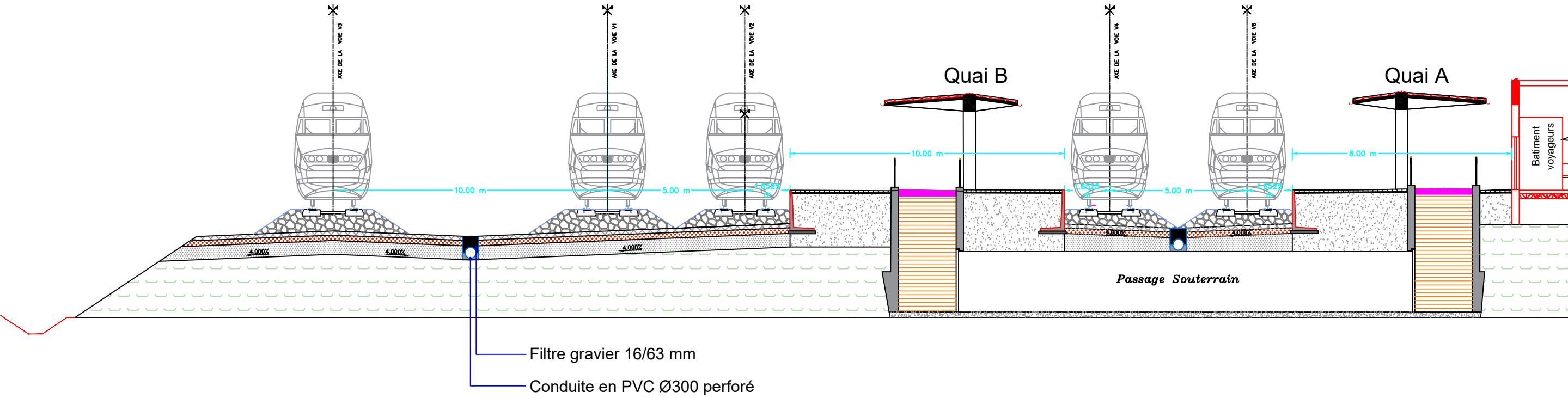
Année universitaire

2025/2026

- PAVE ASSEMBLE
- Terrain Naturelle
- Couche de forme 50 cm
- Couche sous ballast 15 cm
- Couche de fondation 20 cm
- Ballast min 30 cm
- Béton maigre 8 cm
- Béton de propreté 10 cm
- Matériaux de remplissage

PROFILS EN TRAVERS TYPE EN GARE

Echelle: 1/150





CHAPITRE XI

SIGNALISATION FERROVIAIRE

XI. SIGNALISATION FERROVIAIRE

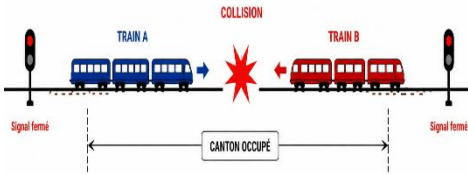
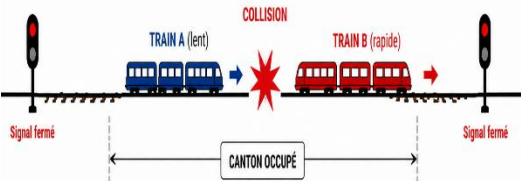
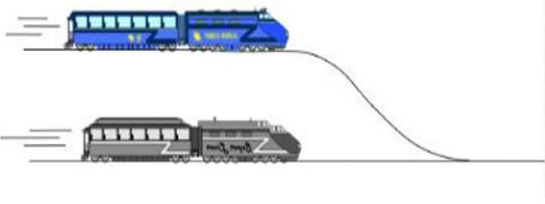
XI.1. Introduction

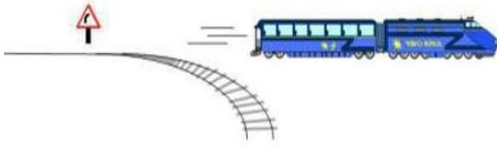
La signalisation ferroviaire constitue un élément fondamental dans l'exploitation du réseau, garantissant la sécurité des circulations et la régularité du trafic. Elle regroupe l'ensemble des dispositifs et systèmes permettant de contrôler, d'orienter et de sécuriser le mouvement des trains, notamment à travers les signaux, les postes d'aiguillage et les systèmes de contrôle automatique. Dans ce chapitre, nous allons présenter les principes de base de la signalisation ferroviaire, ainsi que son rôle essentiel dans la gestion des circulations et la prévention des conflits entre les trains, afin d'assurer une exploitation sûre et efficace du réseau.

XI.2. Les risques ferroviaires

Les trains doivent circuler en toute sécurité. Le tableau suivant résume les cinq risques majeurs liés aux circulations ferroviaires :

Tableau XI-1 : Les risques ferroviaires

Risque	Définition	Configuration	Cause
Nez-à-nez	C'est-à-dire la collision frontale de trains qui circulent en sens contraire sur la même voie		Non-respect d'un signal d'arrêt, erreur d'aiguillage ou défaillance du système de signalisation automatique
Le rattrapage	Des trains qui circulent dans le même sens sur la même voie		Espacement non géré (sur voie unique ou doubles voies)
La prise en écharpe	C'est-à-dire la collision latérale de trains qui circulent sur des itinéraires convergents		Non-respect du Point de Garage Franc

Le déraillement	C'est l'accident où le train quitte les rails		L'usure d'u rail, ou dilatation due à la chaleur, défaillance d'un essieu, ou vitesse excessive dans une courbe.
L'Accident aux Passages à Niveau	Il s'agit de la collision entre un train et un usager de la route (voiture, camion, cycliste).		Passage a niveaux non sécurisé

XI.3. Fonctions des signaux

Les signaux sont essentiellement utilisés pour assurer les fonctions suivantes :

-  Signalisation d'arrêt.
-  Signalisation de limitation de vitesse.
-  Signalisation de direction.

Chacune de ces fonctions comprend habituellement une signalisation d'annonce et une signalisation d'exécution ou de rappel. L'usage veut que la signalisation d'arrêt (exécution et annonce) soit explicitée séparément, alors que les deux dernières forment un tout. En outre, l'expression «la signalisation d'arrêt » est réservée à la signalisation d'exécution d'arrêt.

XI.4. Implantation longitudinale

Afin de permettre au mécanicien de s'arrêter devant un signal d'arrêt (ou un point à protéger) ou de respecter une limitation de vitesse dans une zone délimitée, il est nécessaire de le prévenir à une distance suffisante pour que le freinage puisse être mis en œuvre dans les conditions normales ; c'est le rôle des signaux d'annonce à distance. Ces distances sont appelées, respectivement :

-  Distance d'arrêt.
-  Distance de ralentissement.

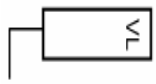
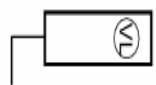
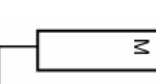
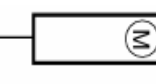
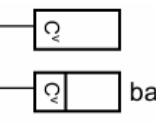
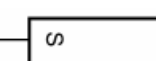
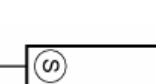
La distance d'implantation d'un signal à distance est fonction :

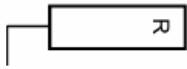
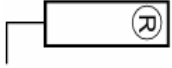
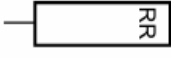
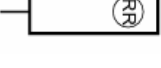
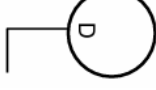
-  Du profil moyen de la partie de voie intéressée (déclivité moyenne).
-  De la vitesse maximale à laquelle est abordé le signal à distance.
-  Des caractéristiques de freinage des circulations.

XI.5. Les signaux ferroviaires

Le tableau suivant présente la signalisation utilisée pour notre projet :

Tableau XI-2 : La signalisation utilisées pour notre projet

Nom du signal	Représentation schématique	Indication présentée	Signification
Feu vert			Le feu vert indique au mécanicien que la marche normale est autorisée, si rien ne s'y oppose
Feu vert clignotant			Equivalent au feu vert fixe pour les trains dont la vitesse-limite ne dépasse pas 160 km/h
Feu jaune clignotant			Le feu jaune clignotant commande au mécanicien d'être en mesure de s'arrêter avant le signal annoncé à distance réduite par l'avertissement suivant.
Avertissement			L'avertissement fermé commande au mécanicien d'être en mesure de s'arrêter avant le ou les signaux d'arrêts : carré ou sémaphore annoncés, ou d'observer un feu rouge clignotant.
Feu blanc			Le feu blanc commande ou confirme au mécanicien l'observation de sa marche en manœuvre
Feu blanc clignotant			Le feu blanc clignotant indique au mécanicien l'exécution d'une manœuvre sur un parcours généralement de faible étendue, et interdit dans tous les cas le départ en ligne d'un train.
Carré violet			Le carré violet fermé commande au mécanicien l'arrêt avant le signal.
Sémaphore			Le sémaphore fermé commande au mécanicien l'arrêt avant le signal.
Feu rouge clignotant			Lorsqu'un mécanicien rencontre un panneau présentant un feu rouge clignotant, il peut sans marquer l'arrêt, s'avancer en marche à vue. Mais il ne doit pas dépasser au franchissement de ce signal la vitesse de 15 km/h.

Ralentissement 30			Le ralentissement 30 fermé commande au mécanicien de ne pas dépasser la vitesse de 30km/h au franchissement de l'aiguillage (ou des aiguillages) correspondant.
Ralentissement 60			Le ralentissement 60 fermé commande au mécanicien de ne pas dépasser la vitesse de 60 km/h au franchissement de l'aiguille (ou des aiguillages) correspondant.
Rappel 30			Le rappel 30 fermé confirme au mécanicien de ne pas dépasser la vitesse de 30 km/h au franchissement de l'aiguillage (ou des aiguillages) correspondant.
Rappel 60			Le rappel 60 fermé confirme au mécanicien de ne pas dépasser la vitesse de 60 km/h au franchissement de l'aiguillage (ou des aiguillages) correspondant.
Disque			Le disque fermé commande au mécanicien de se mettre aussitôt que possible en marche à vue et de marquer l'arrêt au premier signal ou appareil de voie rencontré.

XI.6. Principe de cantonnement

Le cantonnement est la base de l'organisation des circulations. Il consiste à diviser une ligne en tronçons appelés cantons. Un seul train peut circuler dans un canton donné à la fois.

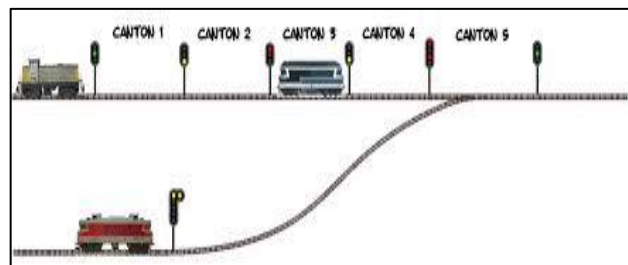


Figure XI-1 : Système de cantonnement

XI.6.1. Types de cantonnement

- ✚ **Cantonnement manuel** : les chefs de gare communiquent entre eux pour autoriser le passage d'un train dans un canton.
- ✚ **Block automatique à permissivité restreinte (BAPR)** : détecteurs de présence (circuits de voie) activent les signaux automatiquement ; en cas d'arrêt absolu, seul un train autorisé peut passer.
- ✚ **Block automatique lumineux (BAL)** : les signaux sont commandés automatiquement par la présence ou l'absence de trains ; les cantons sont plus courts, permettant une plus grande fréquence.

- ✚ **Cantonnement mobile** : dans les systèmes modernes (ERTMS niveau 3), la position exacte du train est transmise en continu par GPS ou balises. Cela permet de réduire l'espacement entre trains, améliorant capacité et sécurité.

XI.7. Le système de signalisation moderne ERTMS

Le système ERTMS (Européen Rail Traffic Management System) est un système européen de signalisation ferroviaire destiné à assurer la sécurité, la gestion du trafic et l'interopérabilité des trains grâce à une communication entre le train et l'infrastructure, notamment via l'ETCS (contrôle de vitesse) et le GSM-R (communication radio). Il se compose de trois niveaux :

- ✚ **Niveau 1** : qui utilise des balises au sol avec une transmission discontinue des informations tout en conservant la signalisation latérale ;
- ✚ **Niveau 2** : basé sur une transmission continue par radio entre le train et un centre de contrôle appelé RBC, avec une signalisation principalement en cabine.
- ✚ **Niveau 3** : fondé sur le principe du bloc mobile, où les trains communiquent en temps réel leur position sans nécessiter de circuits de voie, ce qui permet d'augmenter fortement la capacité et la performance des lignes ferroviaires.

XI.8. Application sur notre projet

Pour réaliser la simulation, les hypothèses suivantes sont prises en compte sur l'ensemble de la ligne, conformément au plan de transport de la ligne minière Est :

La ligne sera équipée d'un système de signalisation moderne avec protection des trains de type ETCS niveau 1.

Le cantonnement sera assuré par un bloc automatique lumineux à contre-sens (BAL avec IPCS « Itinéraire à Contre-Sens »), commandé de manière centralisée. L'ensemble de la ligne sera subdivisé en zones d'influence rattachées à des postes d'enclenchement électroniques, avec des gares à voies banalisées.

Les cantons de pleine voie auront une longueur comprise entre 2,5 et 3 km, et seront équipés de signaux de cantonnement de type BAPR implantés en début et en fin de chaque canton.

Les carrés d'entrée en gare seront définis au cas par cas, avec une distance de référence de 600 m en amont du premier appareil de voie afin de permettre les manœuvres en station.

Pour les carrés de sortie, une longueur utile minimale de 1 000 m est retenue entre deux sorties successives. Les compteurs d'essieux seront implantés à environ 35 m des signaux, tandis que la pédale de fermeture automatique (FA) sera positionnée à 15 m, ce qui conduit à un positionnement du carré de sortie à environ 100 m du groupe fonctionnel (GF), afin d'optimiser la longueur utile de voie.

Enfin, un poste de commande centralisé du trafic reste à définir pour assurer la gestion globale de l'exploitation.

XI.9. Conclusion

La signalisation ferroviaire constitue un élément indispensable pour garantir la sécurité, la régularité et l'efficacité de l'exploitation des lignes ferroviaires. Grâce aux différents dispositifs de signalisation et aux systèmes de cantonnement, elle permet de prévenir les risques de collision, de déraillement et de conflits de circulation. L'intégration des technologies modernes, notamment le système ERTMS avec protection ETCS niveau 1, ainsi que le Block Automatique Lumineux avec IPCS (Installations Permanentes de Contre-Sens), offre une meilleure gestion du trafic, une exploitation plus flexible et une augmentation de la capacité des lignes. Ainsi, le système de signalisation retenu pour notre projet répond aux exigences de sécurité, de performance et de modernisation du réseau ferroviaire.

CHAPITRE XII
ETUDE D'IMPACT SUR
L'ENVIRONNEMENT

XII. ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

XII.1. Introduction

L'étude d'impact sur l'environnement vise à identifier et évaluer les effets du projet sur le milieu naturel et les populations. Elle permet d'analyser les impacts potentiels liés aux travaux et à l'exploitation, puis de proposer des mesures pour les réduire ou les compenser. Ainsi, elle contribue à intégrer les enjeux environnementaux dans la conception du projet et à assurer sa durabilité.

XII.2. Cadre juridique et réglementaire applicable

Afin d'assurer une démarche responsable et pérenne, ce projet s'inscrit dans le strict respect du cadre législatif et réglementaire algérien relatif à la protection de la nature. Cet engagement reflète la priorité accordée par l'État à la préservation des écosystèmes et à la mise en œuvre des principes du développement durable. Le tableau suivant montre les principales dispositions légales à prendre en compte :

Tableau XII-1 : Quelques référence légales et réglementaire

Domaine	Références légales et réglementaires
Protection de l'environnement et développement durable	- Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. - Loi n° 01-20 du 12 Décembre 2001 relative à l'aménagement et au développement durable du territoire.
Étude d'impact sur l'environnement	- Décret exécutif n° 90-78 du 27 février 1990 relatif aux études d'impact sur l'environnement. - Décret exécutif n° 07-145 du 19 mai 2007 déterminant le champ d'application. Le contenu et les modalités d'approbation des études et notices d'impact sur l'environnement.
Faune et flore	- Ordonnance n° 06-05 du 15 juillet 2006 relative à la protection et à la préservation de certaines espèces animales menacées de disparition. - Décret exécutif n° 12-235 du 24 mai 2012 fixant la liste des espèces animales non domestiques protégées.
Patrimoine culturel et sites archéologiques	- Loi n°98-04 du 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel.

La conformité au cadre juridique environnemental est un prérequis non négociable. L'absence d'une EIE validée ou le non-respect des engagements techniques d'atténuation fait peser un risque majeur sur l'entreprise : outre l'arrêt administratif des chantiers, des sanctions pécuniaires et pénales peuvent être prononcées à l'encontre de l'entité et de ses dirigeants.

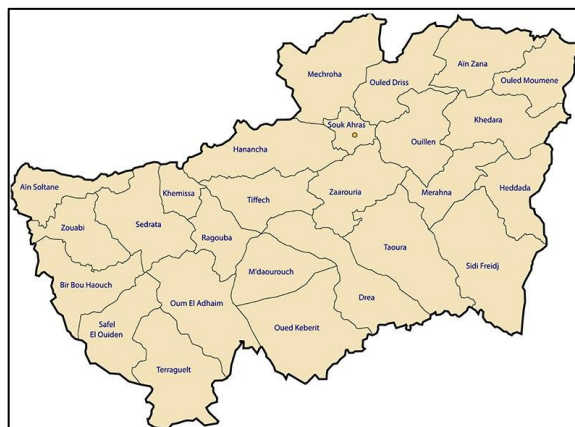
XII.3. Description du Site

La région de Souk-Ahras caractérise par un relief varié entre plaines, collines et zones montagneuses. Elle bénéficie d'un climat méditerranéen avec une végétation riche composée de forêts et de maquis. Elle est traversée par plusieurs oueds importants, notamment l'Oued Medjerda, et possède une biodiversité diversifiée avec des espèces animales et végétales parfois protégées. L'agriculture y est développée grâce à la fertilité des sols, faisant de cette région un espace à forte valeur écologique et économique.

XII.4. Situation géographique et administrative de la wilaya de Souk-Ahras

La Wilaya de Souk-Ahras qui s'étend sur une superficie de 4.359,65 km², est située à l'extrême Nord -Est du pays, et elle est limitée :

- ⇒ Au Nord par les Wilayat d'El-Tarf et Guelma.
- ⇒ A l'Ouest par la Wilaya d'Oum-El-Bouaghi.
- ⇒ Au Sud par la Wilaya de Tébessa.
- ⇒ A l'Est par la Tunisie sur une bande frontalière s'étalant sur 88km.



XII.5. Ressources physiques biologiques et humaines de la région d'étude

Figure XII-1 : Les communes de Souk-Ahras

La zone de Souk-Ahras offre une multitude de richesses naturelles et humaines, ainsi qu'un potentiel économique et touristique remarquable. Le tableau suivant montre les caractéristiques de cette région, allant de sa géologie à ses activités économiques et touristiques.

Tableau XII-2 : Ressource physiques biologiques et humaines de la zone d'étude

Ressource	Type	Description
Physique	Relief	Le relief de la wilaya de Souk-Ahras est constitué de deux grands ensembles hétérogènes distincts : -une zone montagneuse accidentée caractérisée par des déclivités importantes. -une zone de hautes plaines présentant des pentes douces.
	Climat	Climat semi-aride à influence continentale, avec des étés chauds et secs. Les hivers sont frais à froids, relativement humides, avec des précipitations modérées concentrées en saison froide
	Géologie/Hydrogéologie	-formations géologiques rencontrées vont du trias étant la formation la plus ancienne de la zone d'étude -Zone IV selon RPA2024

	Réseau hydrographique	-Eaux superficielles : cours d'eau et oueds et des lacs (oued Medjerda). - Eaux souterraines : cette ressource couvre les besoins de différents secteurs économiques et agricoles comme l'irrigation et l'eau potable
Biologique	Flore	La végétation est dominée par des formations herbacées et steppiques, notamment l'alfa, l'armoïse, le sparte, ainsi que diverses espèces de graminées et plantes spontanées adaptées aux conditions climatiques locales. On y trouve également des zones forestières composées principalement de chêne-liège, chêne zeen et pins dans les secteurs les plus humides et montagneux.
	Faune	La faune de la région est relativement riche et diversifiée. Elle comprend des mammifères tels que le sanglier, le renard roux, le chacal doré, le lièvre et le hérisson. La région abrite également une avifaune variée, dont la cigogne blanche, le héron, la perdrix gambia, le vautour, la tourterelle et divers passereaux comme le moineau. Cette diversité biologique reflète la variété des milieux naturels présents dans la wilaya de Souk-Ahras.
Humaine	Activités économiques	La wilaya de Souk-Ahras est à vocation agricole, avec une production principalement basée sur la céréaliculture, notamment le blé dur, le blé tendre et l'orge, ainsi que sur les cultures fourragères et le maraîchage. L'arboriculture contribue également à la diversification des productions agricoles dans certaines zones. Par ailleurs, l'élevage constitue une activité importante, en particulier la production de viande rouge et blanche ainsi que l'aviculture, ce qui renforce le rôle du secteur agricole dans l'économie locale de la wilaya.
	Les infrastructures de base existantes	-Réseau routier devers : RN. CW. CC. - Réseau ferroviaire : deux axes stratégiques : 1^{er} axe : Annaba – Souk-Ahras - Frontière Tunisienne. 2^{ème} axe : Souk-Ahras – El Kouif (dans la wilaya de Tébessa)
	L'industrie	-l'industrie agroalimentaire liée à la transformation des produits agricoles (céréales, lait, huile) ; -l'industrie de matériaux de construction (briques, granulats, ciment) grâce à la disponibilité des ressources naturelles ; -quelques unités industrielles légères et PME dans les domaines du bois, du plastique et du textile
	Tourisme	La wilaya de Souk-Ahras possède un potentiel touristique important grâce à ses paysages naturels, ses forêts, ses lacs ainsi que son patrimoine historique et archéologique (ruines archéologiques et théâtre romain). Ces atouts favorisent le développement du tourisme écologique, culturel et thermal.

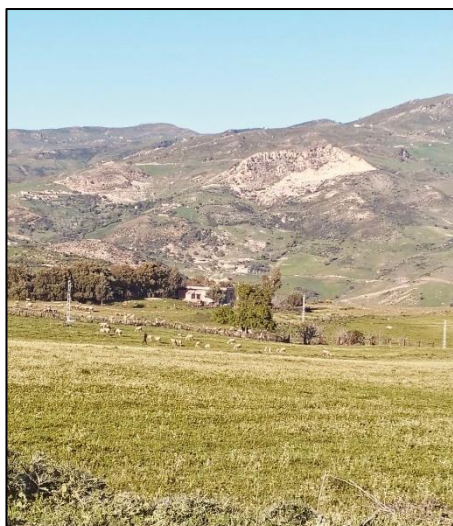


Figure XII-2 : L'élevage des moutons
(photo prise au PK00+125)

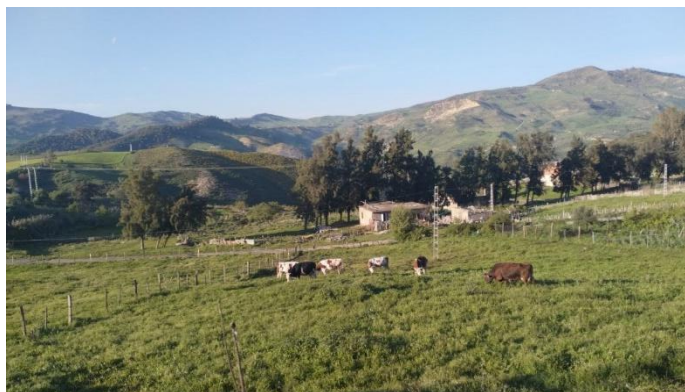


Figure XII-3 : L'élevage des vaches (photo prise au
PK00+425)

XII.6. L'impact du projet

Afin de décrire les effets positifs et négatifs du projet sur l'environnement pendant la période du chantier, ainsi que les mesures envisagées pour éviter, réduire les impacts négatifs et à défaut compenser les impacts résiduels

XII.6.1. Les impacts positifs

Les impacts positifs sont les effets bénéfiques ou favorables qu'un projet peut produire sur l'environnement. Ils correspondent aux améliorations apportées par le projet, comme l'amélioration des conditions de vie.

Tableau XII-3 : Les impacts positifs directs et indirects du projet

Direct	Indirect
-Amélioration de la capacité de transport ferroviaire grâce aux modernisations de la ligne. -Réduction des temps de trajet et amélioration de la fluidité du trafic. -Amélioration de la sécurité et de la fiabilité de l'exploitation ferroviaire. -Création d'emplois directs pendant la phase de construction. -Amélioration des conditions de transport pour les usagers et les marchandises.	-Dynamisation du développement économique régional grâce à l'amélioration de la desserte ferroviaire. -Création d'emplois indirects dans les secteurs liés au transport, aux services et aux travaux publics. -Réduction de la congestion routière grâce au transfert d'une partie du trafic vers le rail, réduisant les dépenses d'entretien des routes. - L'amélioration de l'accessibilité, attraction de nouvelles entreprises.

XII.6.2. Les impacts négatifs et les solutions d'atténuation envisagées

Les impacts négatifs sont les effets défavorables ou indésirables qu'un projet, une activité ou une action peut engendrer sur l'environnement. Ils correspondent aux dégradations ou perturbations possibles.

Tableau XII-4 : Identification des impacts négatifs du projet et les mesures d'atténuation proposées

Catégorie d'impact	Impacts négatifs	Solutions d'atténuation proposées
Sols	-Risque de déraillement : déversement des phosphates	-Le projet de modernisation, dédoublement et rectification du tracé vise à augmenter la capacité de transport de la ligne commerciale. -Il permet également de répondre à la demande future croissante de la clientèle.
Eau (superficielle / souterraine)	-risque de pollution des cours d'eau (Oued Medjrda, Oued EL Beriche) existe au niveau des zones de viaducs et tunnels -Les eaux superficielles et souterraines sont sensibles aux accidents de chantier pouvant entraîner une pollution rapide en cas de déversement de matières polluantes - Le stockage de produits polluants peut entraîner une contamination en cas de pluie.	- Le stationnement et le ravitaillement des engins doivent se faire sur des aires imperméabilisées, éloignées des zones de ruissellement et des cours d'eau - Une intervention rapide doit être assurée en cas de fuite ou de déversement accidentel d'hydrocarbures - Les huiles de vidange et liquides polluants doivent être récupérés dans des réservoirs étanches et évacués par des entreprises agréées.
Flore	- Le tracé traverse une zone forestière de la wilaya de Souk-Ahras -déversement des phosphates dans l'environnement - Les travaux engendrent une occupation importante de l'espace - La phase travaux peut également provoquer une dispersion de poussières	- Limiter l'emprise du chantier - Humidifier les pistes pour minimiser la dispersion de Matières En Suspension
Faune	- Risque de destruction/ dérangement Les travaux de creusement des tunnels peuvent perturber ou détruire des nichées d'oiseaux en milieu forestier. -Ils peuvent déranger des espèces protégées des oueds (cigogne blanche, poule d'eau) à cause du bruit et des poussières. -Ils risquent d'affecter certains mammifères en période d'hibernation ou de faible mobilité (hérisson, lièvre, chauves-souris, etc.). -Ils peuvent également impacter les reptiles, par la destruction des œufs en été ou des individus peu actifs en hiver (comme la tortue grecque).	-Afin de réduire les impacts sur les nichées d'oiseaux et les espèces en hibernation (hérisson, rhinophope de Méhely, lièvre, reptiles), il est recommandé de planifier les travaux en dehors des périodes de nidification et d'hibernation. - Les travaux de nuit seront limités pour réduire la période de dérangement. - Passages sous-viaducs - Localisation des passages a faune projetés (comme les dalots)

Milieux humain	-Le bruit avec différentes sources : la présence d'engins de travaux publics (camions utilisés pour les terrassements et la mise en œuvre du béton), creusement des tunnels par tirs d'explosif, creusement pour les piles des Viaducs. -La qualité de l'air -Les vibrations -Les déplacements urbains et les accès riverains, -La gestion des déchets	-Le travail de nuit et les jours fériés est interdit sans autorisation préalable du maître d'ouvrage et des autorités concernées. -Les engins et matériels de chantier doivent être conformes à la réglementation en vigueur -Le brûlage sur site est interdit afin de préserver la qualité de l'air. -Les véhicules thermiques doivent respecter les normes de rejets polluants. -L'arrosage des sols sera effectué si nécessaire pour limiter les émissions de poussières. - Les accès des riverains et commerces doivent être maintenus avec des itinéraires de déviation adaptés. -Les zones de stockage et les engins doivent être éloignés des zones habitées. -La gestion des déchets doit être assurée par des bennes adaptées, avec tri sélectif et sécurisation du chantier.
Milieux agricoles	-Consommation d'espaces exploités : prélèvement de terres agricoles par l'implantation de l'infrastructure - Acquisition de bâtiments d'exploitation (siège ou autres) -Modification de la structure des exploitations et des cheminements agricoles du fait de la coupure des exploitations par la voie ferrée -Effets induits suite à des modifications du milieu physique (contexte microclimatique,	-Les accès agricoles seront maintenus grâce à des aménagements provisoires afin de ne pas perturber les activités agricoles. -La création de pistes par les engins de chantier dans les zones cultivées sera limitée au maximum. -Une attention particulière sera accordée à la réduction des émissions de poussières près des cultures sensibles. -L'aspersion des sols avec de l'eau pourra être réalisée pour limiter les poussières. - Expropriation des surfaces de terrains Non agricoles

XII.7. Conclusion

L'étude d'impact environnemental montre que le projet de modernisation de la ligne Minière Est apporté des bénéfices importants en termes de transport et de développement économique, mais qu'il peut aussi générer des impacts négatifs sur les milieux naturels. D'où la nécessité de mettre en place des mesures de protection et de suivi pour réduire ces effets et assurer un meilleur équilibre environnemental.

CHAPITRE XIII
DEVIS QUANTITATIF ET
ESTIMATIF

XIII. DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF**Tableau XIII-1: Devis quantitatif et estimatif**

N° Article	Désignations	Unité	Quantité	Prix Unitaire	Montant HT
1	ÉTUDE D'EXÉCUTION ET INSTALLATION DE CHANTIER				
1-1	Amenée du matériel et installation générale de chantier	F	1.00	261 532 446.00	261 532 446.00
1-2	Fourniture et installation d'un laboratoire de chantier	F	1.00	488 146 706.00	488 146 706.00
1-3	Étude d'exécution et plan de recollement	F	1.00	50 000 000.00	50 000 000.00
TOTAL 1					799 679 152,00
2	DÉGAGEMENT D'EMPRISE				
2-1	Démolition des habitations et bidonvilles	M2	26929	2500.00	67 322 500,00
TOTAL 2					67 322 500,00
3	TERRASSEMENTS GENERAUX				
3-1	Décapage des terres végétale	M3	149467,64	527,40	78 829 233,34
3-2	Déblais en terres mise en dépôt	M3	3377911,25	569,60	1 924 058 248,00
3-3	Remblai provenant des zones d'emprunt	M3	228235,36	1 300,00	296 705 968,00
3-4	Fourniture Mise en place du Géotextile	M2	24805,6	1 650,00	40 929 240,00
3-5	Matériau de zone inondable/humide	M3	38029,60	4 200,00	159 724 320,00
TOTAL 3					2 500 247 009,34
4	ASSISE FERROVIAIRE				
4-1	Fourniture et mise en place du matériau pour Couche de forme	M3	55938.03	1 600,00	89 500 848,00
4-2	Fourniture et mise en place du matériau pour Couche de fondation	M3	20804.8	3 375,40	70 224 521,92
4-3	Fourniture et mise en place du matériau pour Couche de sous ballast	M3	15049.57	3 500,00	52 673 495,00
4-4	Fourniture et pose de Ballast	M3	91483.58	7 547,68	690 488 787,09
TOTAL 4					902 887 652,01

5	DRAINAGE ET ASSAINISSEMENT				
5-1	Buses en béton arme diamètre (1500)	ML	175	50 000,00	8 750 000,00
5-2	Dalot en béton armé (2 × 1.5)- (2 × 2)	M3	352,08	45000,00	15 843 600,00
5-3	Fossé en béton arme.	ML	8160	5 900,00	48 144 000,00
5-4	Semi buse DN 400 mm	ML	10525	5 880,00	61 887 000,00
TOTAL 5					134 624 600,00
6	TRAVAUX DE VOIE				
6-1	Fourniture des rails neufs UIC 60	T	5132.90	330 000,00	1 693 857 000,00
6-2	Pose de la voie à blanc	ML	42625	8 940,00	381 067 500,00
6-3	Fourniture des traverses bi-bloc en béton armé (VAX U31)	U	53580	10 000,00	535 800 000,00
6-4	Fourniture des traverses monobloc	U	17567	15 000,00	263 505 000,00
6-5	Fourniture des attachés pour le rail UIC60	U	284588	1400,00	398 423 200,00
6-6	Fourniture semelle cannelée	U	142294	300,00	42 688 200,00
6-7	Soudure aluminothermique	U	296	22 451,05	6 645 510,80
6-8	Soudure électrique	U	4736	22 451,05	106 328 172,80
TOTAL 6					3 428 314 583.60
7	TRAVAUX DE LA GARE				
7-1	Fourniture des ADV UIC E1 60-500-1/12	U	13	26 000 000,00	338 000 000,00
7-2	Fourniture des ADV UIC E1 60-300-1/9	U	2	22 000 000,00	44 000 000,00
7-3	Traverse de garage franc	U	15	59 307,00	889 605,00
7-4	Bâtiment voyageurs	M2	1316.44	92 000,00	121 112 480,00
7-5	Heurtoir	U	1	1 121 901,00	1 121 901,00
7-6	Fourniture et pose des quais avec ces installations	ML	500	150 000,00	75 000 000,00
7-7	Passage souterrain	F	1	31 112 900,00	31 112 900,00
7-8	Fourniture et pose des regards	U	88	6000.00	528 000.00

7-9	Fourniture et mise en œuvre de tranchée drainant	ML	1631	1700.00	2772700.00
7-10	Réalisation des travaux d'aménagement extérieur de la gare	M2	2440	40 000,00	97 600 000,00
TOTAL 7					712 078 279,00
8	SIGNALISATION ET ELECTRIFICATION				
8-1	Électrification 25 kV/50 Hz	F	1	255 000 000,00	255 000 000,00
TOTAL 8					255 000 000,00
9	OUVRAGE D'ART				
9-1	Viaduc	M2	128690,4	350 000,00	45 041 640 000,00
9-2	Tunnel	ML	5270	150 0000,00	7 905 000 000,00
9-3	Passage supérieure	U	2	137 731 152,09	275462304,18
9-4	Mur de soutènement	ML	202	500 000,00	75 000 000,00
TOTAL 9					53 297 102 304,18
Montant total du projet (hors taxe)					62 082 295 271,73
Montant de TVA (19%)					11 795 636 101,63
Montant total du projet (TTC)					73 877 931 373,36

⇒ **Montant total en TTC (EN LETTRE)**

Soixante-treize milliards huit cent soixante-dix-sept millions neuf cent trente et un mille trois cent soixante-treize dinars et trente-six centimes.



CHAPITRE XIV

PLANIFICATION DU

PROJET

XIV. Planification du projet

XIV.1. Introduction

L'organisation d'un chantier constitue un facteur essentiel pour la réussite de tout projet de construction. Elle regroupe l'ensemble des actions de planification, de coordination et de suivi des travaux, depuis la préparation du site jusqu'à la réception finale de l'ouvrage.

Avant le démarrage des travaux, une planification détaillée est nécessaire afin de structurer et d'harmoniser les différentes phases du projet. Cette étape permet d'assurer une exécution efficace des travaux dans des conditions optimales de délai, de qualité et de sécurité.

XIV.2. Les objectifs de la planification

La planification d'un chantier vise à assurer une exécution optimale des travaux tout en respectant les contraintes de délai, de coût et de qualité. Ses principaux objectifs sont :

- ⇒ Optimiser la rentabilité du projet en assurant une gestion efficace des ressources disponibles.
- ⇒ Garantir la compréhension des exigences techniques, des délais et des critères de qualité par l'ensemble des intervenants.
- ⇒ Organiser les travaux selon une séquence logique afin d'assurer un enchaînement fluide et efficace des opérations.
- ⇒ Identifier les risques potentiels et mettre en place des mesures préventives pour en limiter les impacts.

XIV.3. Le diagramme de GANTT

Le diagramme de Gantt est un outil de gestion de projet permettant de représenter les tâches et les activités sur une période donnée à l'aide de barres horizontales. Chaque barre correspond à une tâche, dont la longueur représente la durée et la position indique son déroulement dans le temps. Il permet ainsi d'identifier les dates de début et de fin de chaque activité, ainsi que les tâches critiques influençant le planning global du projet.

Lors de l'élaboration d'un planning Gantt, plusieurs éléments essentiels doivent être pris en compte :

- ⇒ Il offre une vision globale et claire du projet, facilitant la compréhension des différentes étapes et des délais par l'équipe.
- ⇒ Il permet de suivre l'avancement des travaux en comparant les tâches prévues et réalisées, ce qui aide à détecter les éventuels retards et à mettre en place des actions correctives.
- ⇒ Il contribue à une meilleure gestion des ressources en mettant en évidence les périodes de surcharge ou de sous-utilisation, afin d'optimiser leur affectation.

XIV.4. Le diagramme de PERT

Le diagramme PERT (Program Evaluation and Review Technique) est un outil de planification et de gestion de projet qui permet de représenter les différentes tâches sous forme de réseau logique. Il met en évidence les relations de dépendance entre les activités ainsi que leur enchaînement dans le temps, afin de mieux organiser et optimiser le déroulement du projet.

Les principaux éléments à prendre en compte dans un diagramme PERT sont :

- ⇒ Il permet de représenter les tâches sous forme de nœuds ou d'arcs, en indiquant leurs dépendances.
- ⇒ Il aide à identifier le chemin critique, c'est-à-dire la séquence de tâches qui détermine la durée totale du projet.
- ⇒ Il facilite l'estimation des délais en prenant en compte les durées optimistes, probables et pessimistes des activités.
- ⇒ Il améliore la coordination entre les différentes tâches en mettant en évidence leur ordre logique d'exécution.

XIV.5. Résumé de notre projet

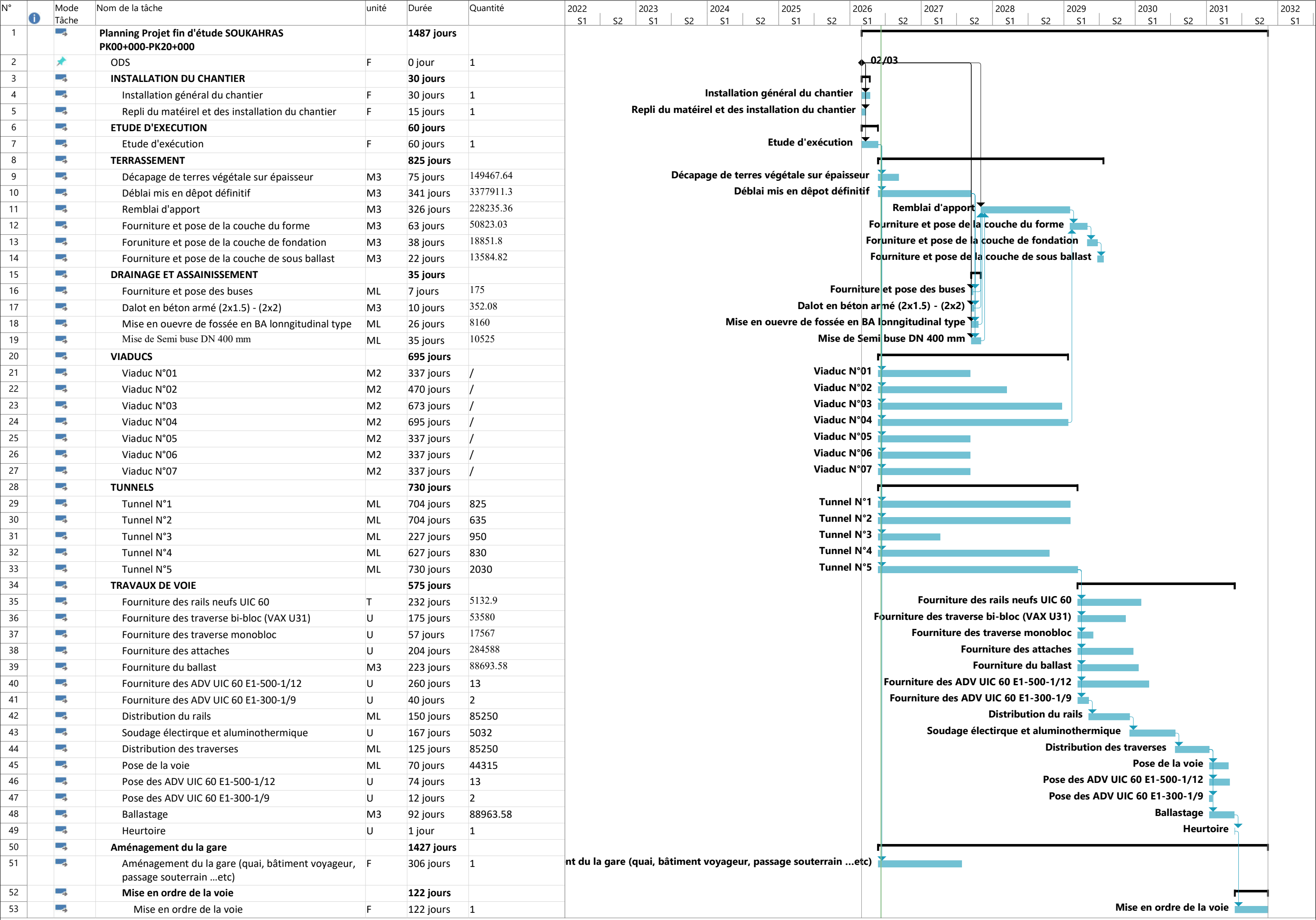
Dans ce projet, nous avons créé un diagramme de Gantt avec MS Project. Après avoir intégré les données du projet. Le délai d'exécution de ce projet est fixé à 52 mois, répartis selon le tableau suivant :

Tableau XIV-1 : Délai d'exécution du projet

Lot	Le délai d'exécution (jours)
Installation du chantier	30
Etude d'exécution	60
Terrassement généraux	825
Drainage et assainissement	35
Viaducs	695
Tunnels	730
Travaux du voies	575
Aménagement du la gare	180
Mise en ordre de la voie	122
Total	52 mois

XIV.6. Conclusion

Une planification rigoureuse est essentielle à la réussite de tout projet. Dans ce chapitre, les principales étapes de la planification ont été présentées, depuis la définition des objectifs jusqu'à l'élaboration des plannings détaillés. Afin d'assurer la fiabilité et la qualité du planning, l'appui d'ingénieurs spécialisés en planification a été sollicité.



CONSLUION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Le présent Projet de Fin d'Études, intitulé « Étude en APD de dédoublement et/ou rectification du tracé pour augmenter la capacité de la ligne ferroviaire minière Est, section Centre (Bouchegouf – Oued El Kebrit), sur le tronçon du PK 00+000 au PK 20+000 avec la conception de la gare de Souk-Ahras », nous a permis d'aborder de manière concrète les différentes problématiques liées à la conception, au dimensionnement et à l'optimisation d'une infrastructure ferroviaire destinée à un trafic marchandises intensif.

Au-delà des objectifs techniques du projet, cette étude a constitué une expérience particulièrement enrichissante, nous permettant de mettre en pratique les connaissances acquises au cours de notre formation et de développer une vision globale des projets ferroviaires. Elle nous a également sensibilisés aux contraintes réelles rencontrées lors de la conception et de l'exploitation des infrastructures de transport.

Ce projet nous a notamment permis de comprendre, d'assimiler et de mettre en œuvre les tâches suivantes :

- ⇒ **Le dimensionnement d'une voie ferrée sur dalle béton** : adaptée aux fortes charges du trafic minier, tout en respectant les exigences de sécurité, de durabilité et de maintenance de l'infrastructure.
- ⇒ **L'analyse et le choix des principaux composants ferroviaires** : notamment les rails, traverses, attaches, appareils de voie et appareils de dilatation, à travers une évaluation technique, économique et opérationnelle des différentes solutions disponibles.
- ⇒ **La conception et l'optimisation du tracé ferroviaire** : dans un environnement contraignant, en recherchant un équilibre entre performances géométriques, volumes de terrassements, ouvrages d'art et coûts de réalisation.
- ⇒ **Le dimensionnement de la gare de Souk-Ahras** : à partir des besoins d'exploitation, en déterminant le nombre des voies nécessaires, leurs longueurs utiles ainsi que l'organisation générale des installations ferroviaires.
- ⇒ **L'évaluation de la capacité de la ligne ferroviaire** : permettant d'identifier les aménagements nécessaires pour améliorer la fluidité du trafic et répondre aux objectifs de transport futurs.
- ⇒ **La conception d'une infrastructure répondant aux besoins du développement du transport minier** : en contribuant à l'augmentation des tonnages transportés et au renforcement du rôle du rail dans la logistique nationale.

Les résultats obtenus démontrent que les solutions proposées permettent d'améliorer significativement les performances de la ligne étudiée, notamment en matière de capacité, de régularité et de qualité d'exploitation. Ce projet constitue ainsi une contribution au développement du réseau ferroviaire national et à l'accompagnement des ambitions du secteur minier en Algérie.

Enfin, ce travail nous a permis d'acquérir une compréhension approfondie des différentes phases d'une étude ferroviaire en Avant-Projet Détaillé (APD), depuis les études de tracé jusqu'au dimensionnement des installations d'exploitation. Il représente une expérience formatrice majeure qui nous a permis de développer les compétences techniques,

méthodologiques et analytiques indispensables à l'exercice du métier d'ingénieur ferroviaire et à la réalisation de futurs projets d'infrastructure à grande échelle.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] SNTF, Référentiel technique, version 2, chapitre 6 : Géométrie de la voie, 2005.
- [2] SNCF IN 0272, Conception du tracé de la voie courante $V \leq 220$ km/h.
- [3] SNTF, Référentiel technique, version 2, Chapitre 7 : Hydraulique drainage, 2005.
- [4] SNTF, Appareils de voie
- [5] UIC 719 R, Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaire, 3ème Edition.
- [6] UIC 703 R, Géométrie de la voie, 2ème Edition.
- [7] UIC 506 OR, Règles pour l'application des gabarits ferroviaires, 2ème Edition.
- [8] UIC 741 OR, Quai des gares à voyageurs, 4ème Edition.
- [9] UIC 774-3R, Interaction voie/ouvrages, 2ème Edition.
- [10] IN0231, Appareils de dilatation pour ouvrages d'art.
- [11] EN 16432-2 :2014, Railway applications-Ballastless track systems-Part2: Subsystems and components
- [12] SETIRAIL, « Rapport de l'étude géologique et géotechnique ».
- [13] SETIRAIL, « Rapport de l'étude hydrologique et hydraulique ».
- [14] Guide des terrassements routiers, Fascicule II, 2ème Edition.
- [15] Sétra, Guide technique : Assainissement routier, Octobre 2006.
- [16] Cours hydraulique et assainissement de Dr.RHMANI Douadi ENSTP.
- [17] Cours stabilité des pentes de Dr.HAMADI Kamel ENSTP.
- [18] Cours voie ferrée de Mr. RAMDANE Ismail ENSTP.
- [19] Cours voie ferrée Mr.MORSLI Rabeh. ENSTP.
- [20] Monographie de la wilaya de Souk Ahras, <https://Souk-Ahras.mta.gov.dz>, 2019.
- [21] Document pédagogique Établissement public de sécurité ferroviaire, Les signaux - Les régimes d'exploitation des lignes – Les systèmes d'espacement des trains.
- [22] La signalisation ferroviaire, Presses de l'école nationale des ponts et chaussée.



ANNEXES

ANNEXE A

Annexe A1 : Listing axe en plan

Eléments Caractéristiques				Points de Contacts		
Nom	Paramètres		Longueur	Abscisse	X	Y
Droite 1	Gisement	166.40gr	575.794	0.000	402691.061	4020386.713
Clothoïde 1	Paramètre	300.000	60.000	575.794	402981.041	4019889.269
Arc 1	Rayon	1500.000 m	270.708	635.794	403011.602	4019837.637
	Centre X	404292.125 m				
	Centre Y	4020618.829 m				
Clothoïde 2	Paramètre	300.000	60.000	906.502	403172.619	4019620.478
Droite 2	Gisement	152.36gr	848.577	966.502	403213.145	4019576.235
Clothoïde 3	Paramètre	254.755	110.000	1815.079	403790.483	4018954.332
Arc 2	Rayon	590.000 m	708.965	1925.079	403867.761	4018876.109
	Centre X	404260.916 m				
	Centre Y	4019316.029 m				
Clothoïde 4	Paramètre	254.755	110.000	2634.044	404529.335	4018790.623
Droite 3	Gisement	64.00gr	163.436	2744.044	404623.959	4018846.633
Clothoïde 5	Paramètre	254.755	110.000	2907.480	404761.948	4018934.213
Arc 3	Rayon	590.000 m	928.053	3017.480	404856.571	4018990.223
	Centre X	405124.990 m				
	Centre Y	4018464.817 m				
Clothoïde 6	Paramètre	254.755	110.000	3945.533	405650.978	4018732.094
Droite 4	Gisement	176.00gr	130.480	4055.533	405694.606	4018631.161
Clothoïde 7	Paramètre	252.982	80.000	4186.013	405742.630	4018509.840
Arc 4	Rayon	800.000 m	545.532	4266.013	405773.307	4018435.965
	Centre X	406501.503 m				
	Centre Y	4018767.220 m				
Clothoïde 8	Paramètre	252.982	80.000	4811.545	406144.939	4018051.076
Droite 5	Gisement	126.23gr	1230.571	4891.545	406217.693	4018017.830
Clothoïde 9	Paramètre	257.876	70.000	6122.116	407345.311	4017525.099
Arc 5	Rayon	950.000 m	152.465	6192.116	407409.102	4017496.286
	Centre X	406996.907 m				
	Centre Y	4016640.368 m				
Clothoïde 10	Paramètre	257.876	70.000	6344.581	407540.582	4017419.418
Droite 6	Gisement	141.13gr	350.676	6414.581	407596.981	4017377.962
Clothoïde 11	Paramètre	254.755	110.000	6765.258	407876.967	4017166.818
Arc 6	Rayon	590.000 m	374.505	6875.258	407966.773	4017103.371
	Centre X	408276.624 m				
	Centre Y	4017605.459 m				
Clothoïde 12	Paramètre	254.755	110.000	7249.763	408324.854	4017017.433

ANNEXES

Droite 7	Gisement	88.86gr	63.079	7359.763	408433.674	4017033.211
Clothoïde 13	Paramètre	254.755	110.000	7422.842	408495.789	4017044.197
Arc 7	Rayon	590.000 m	190.373	7532.842	408604.608	4017059.975
	Centre X	408652.839 m				
	Centre Y	4016471.950 m				
Clothoïde 14	Paramètre	254.755	110.000	7723.214	408793.558	4017044.923
Droite 8	Gisement	121.27gr	817.979	7833.214	408898.507	4017012.116
Clothoïde 15	Paramètre	254.755	110.000	8651.193	409671.270	4016743.925
Arc 8	Rayon	590.000 m	721.254	8761.193	409773.980	4016704.664
	Centre X	409529.492 m				
	Centre Y	4016167.704 m				
Clothoïde 16	Paramètre	254.755	110.000	9482.447	410117.655	4016121.180
Droite 9	Gisement	210.96gr	350.090	9592.447	410102.193	4016012.315
Clothoïde 17	Paramètre	254.755	110.000	9942.537	410042.220	4015667.400
Arc 9	Rayon	590.000 m	569.851	10052.537	410026.758	4015558.535
	Centre X	410614.921 m				
	Centre Y	4015512.011 m				
Clothoïde 18	Paramètre	254.755	110.000	10622.388	410242.154	4015054.688
Droite 10	Gisement	137.60gr	865.964	10732.388	410331.535	4014990.643
Clothoïde 19	Paramètre	259.808	90.000	11598.352	411050.781	4014508.377
Arc 10	Rayon	750.000 m	233.594	11688.352	411124.503	4014456.779
	Centre X	410670.217 m				
	Centre Y	4013860.017 m				
Clothoïde 20	Paramètre	259.808	90.000	11921.947	411285.522	4014288.852
Droite 11	Gisement	165.07gr	90.837	12011.947	411333.981	4014213.029
Clothoïde 21	Paramètre	254.755	110.000	12102.783	411381.357	4014135.526
Arc 11	Rayon	590.000 m	404.587	12212.783	411441.593	4014043.535
	Centre X	411914.161 m				
	Centre Y	4014396.776 m				
Clothoïde 22	Paramètre	254.755	110.000	12617.370	411772.106	4013824.133
Droite 12	Gisement	109.55gr	94.981	12727.370	411880.267	4013804.338
Clothoïde 23	Paramètre	254.755	110.000	12822.351	411974.182	4013790.150
Arc 12	Rayon	590.000 m	508.255	12932.351	412082.343	4013770.355
	Centre X	411940.287 m				
	Centre Y	4013197.711 m				
Clothoïde 24	Paramètre	254.755	110.000	13440.606	412467.328	4013462.906
Droite 13	Gisement	176.26gr	431.168	13550.606	412510.556	4013361.802
Clothoïde 25	Paramètre	254.755	110.000	13981.774	412667.664	4012960.276
Arc 13	Rayon	590.000 m	712.251	14091.774	412710.892	4012859.172
	Centre X	413237.933 m				
	Centre Y	4013124.366 m				

Clothoïde 26	Paramètre	254.755	110.000	14804.025	413298.357	4012537.468
Droite 14	Gisement	87.53gr	744.995	14914.025	413406.826	4012555.501
Clothoïde 27	Paramètre	254.755	110.000	15659.020	414137.584	4012700.451
Arc 14	Rayon	590.000 m	307.552	15769.020	414244.723	4012725.185
	Centre X	414076.558 m				
	Centre Y	4013290.712 m				
Clothoïde 28	Paramètre	254.755	110.000	16076.572	414504.012	4012884.040
Droite 15	Gisement	42.48gr	509.723	16186.572	414574.709	4012968.257
Clothoïde 29	Paramètre	254.755	110.000	16696.295	414890.147	4013368.653
Arc 15	Rayon	590.000 m	1201.862	16806.295	414960.844	4013452.870
	Centre X	415388.299 m				
	Centre Y	4013046.198 m				
Clothoïde 30	Paramètre	254.755	110.000	18008.157	415943.723	4013245.207
Droite 16	Gisement	184.03gr	575.676	18118.157	415974.311	4013139.589
Clothoïde 31	Paramètre	257.876	70.000	18693.832	416117.198	4012581.928
Arc 16	Rayon	950.000 m	148.097	18763.832	416133.738	4012513.915
	Centre X	415205.405 m				
	Centre Y	4012312.174 m				
Clothoïde 32	Paramètre	257.876	70.000	18911.929	416153.803	4012367.335
Droite 17	Gisement	198.65gr	1018.764	18981.929	416156.149	4012297.378
				20000.000	416177.801	4011278.844
Longueur totale de l'axe 20000.000 mètre(s)						

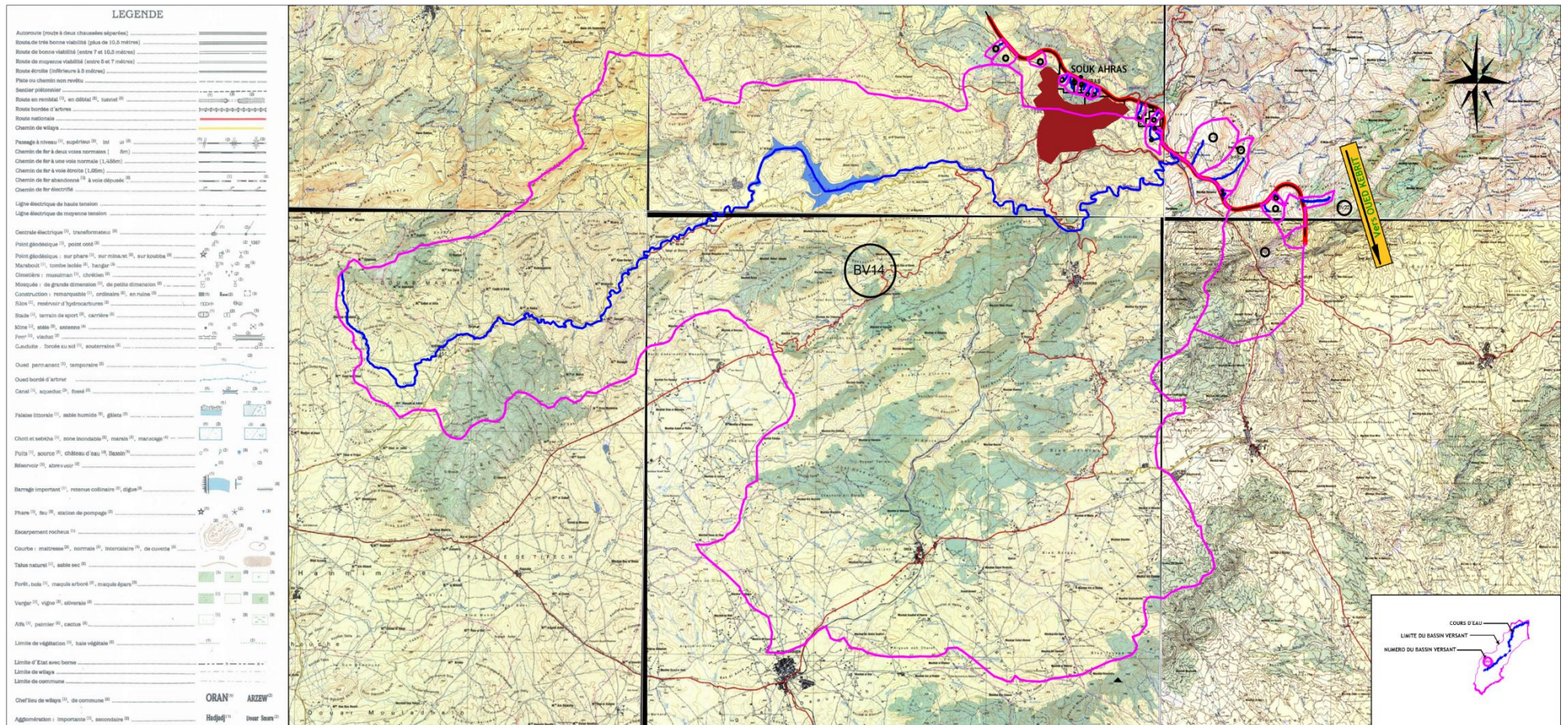
ANNEXES

Annexe A2 : Listing profil en long

Elts Caractéristiques				Points de Contacts	
Nom	Pente / Rayon		Longueur	Abscisse	Altitude
Pente 1	Pente	0.000 %	1652.003	0.000	740.191
Cercle 1	Rayon	-6000.000 m	95.988	1652.003	740.191
	Sommet Absc.	1652.003 m			
	Sommet Alt.	740.191 m			
Pente 2	Pente	-1.600 %	1877.785	1747.991	739.423
Cercle 2	Rayon	-25000.000 m	98.361	3625.775	709.378
	Sommet Absc.	3225.827 m			
	Sommet Alt.	712.578 m			
Pente 3	Pente	-1.994 %	7330.642	3724.136	707.611
Cercle 3	Rayon	7000.000 m	260.575	11054.778	561.465
	Sommet Absc.	11194.304 m			
	Sommet Alt.	560.074 m			
Pente 4	Pente	1.730 %	3057.218	11315.352	561.121
Cercle 4	Rayon	-10000.000 m	156.732	14372.570	613.996
	Sommet Absc.	14545.496 m			
	Sommet Alt.	615.491 m			
Pente 5	Pente	0.162 %	1864.804	14529.303	615.478
Cercle 5	Rayon	9000.000 m	114.046	16394.107	618.498
	Sommet Absc.	16379.533 m			
	Sommet Alt.	618.486 m			
Pente 6	Pente	1.431 %	3492.540	16508.153	619.405
				20000.000	669.323
Longueur totale de l'axe 20000.000 mètre(s)					
Longueur développée totale de l'axe 20003.255 mètre(s)					

ANNEXE B

Annexe B1 : Délimitation des bassins versants



ANNEXES

Annexe B2 : Canalisation circulaire partiellement remplie

Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh
0,0021	0,189	0,033	0,06	0,548	0,166	0,1179	0,67	0,232	0,1758	0,75	0,283	0,2337	0,814	0,329	0,2916	0,866	0,37
0,0031	0,219	0,04	0,0611	0,551	0,167	0,119	0,672	0,233	0,1769	0,752	0,284	0,2348	0,815	0,329	0,2927	0,867	0,371
0,0042	0,249	0,048	0,0621	0,554	0,169	0,12	0,674	0,234	0,1779	0,753	0,285	0,2359	0,816	0,33	0,2938	0,867	0,371
0,0053	0,266	0,053	0,0632	0,557	0,17	0,1211	0,676	0,235	0,179	0,755	0,286	0,2369	0,817	0,331	0,2948	0,868	0,372
0,0064	0,278	0,057	0,0643	0,56	0,172	0,1222	0,677	0,236	0,1801	0,756	0,287	0,238	0,818	0,332	0,2959	0,869	0,373
0,0074	0,29	0,061	0,0653	0,563	0,173	0,1233	0,679	0,237	0,1812	0,757	0,288	0,2391	0,819	0,333	0,297	0,87	0,373
0,0085	0,302	0,065	0,0664	0,566	0,175	0,1243	0,681	0,238	0,1822	0,759	0,289	0,2401	0,82	0,333	0,2981	0,871	0,374
0,0096	0,315	0,069	0,0675	0,569	0,176	0,1254	0,682	0,239	0,1833	0,76	0,29	0,2412	0,821	0,334	0,2991	0,872	0,375
0,0107	0,327	0,073	0,0686	0,571	0,177	0,1265	0,684	0,24	0,1844	0,762	0,29	0,2423	0,822	0,335	0,3002	0,873	0,376
0,0117	0,337	0,076	0,0696	0,574	0,179	0,1275	0,686	0,241	0,1855	0,763	0,291	0,2434	0,823	0,336	0,3013	0,874	0,376
0,0128	0,344	0,079	0,0707	0,576	0,18	0,1286	0,687	0,242	0,1865	0,764	0,292	0,2444	0,824	0,337	0,3023	0,874	0,377
0,0139	0,352	0,082	0,0718	0,579	0,181	0,1297	0,689	0,243	0,1876	0,766	0,293	0,2455	0,825	0,337	0,3034	0,875	0,378
0,0149	0,36	0,085	0,0729	0,582	0,183	0,1308	0,691	0,244	0,1887	0,767	0,294	0,2466	0,826	0,338	0,3045	0,876	0,378
0,016	0,367	0,088	0,0739	0,584	0,184	0,1318	0,692	0,245	0,1897	0,768	0,295	0,2477	0,828	0,339	0,3056	0,877	0,379
0,0171	0,375	0,09	0,075	0,587	0,185	0,1329	0,694	0,246	0,1908	0,77	0,296	0,2487	0,829	0,34	0,3066	0,878	0,38
0,0182	0,382	0,093	0,0761	0,589	0,187	0,134	0,696	0,247	0,1919	0,771	0,297	0,2498	0,83	0,341	0,3077	0,879	0,381
0,0192	0,39	0,096	0,0771	0,592	0,188	0,1351	0,698	0,248	0,193	0,773	0,298	0,2509	0,831	0,341	0,3088	0,88	0,381
0,0203	0,397	0,099	0,0782	0,594	0,189	0,1361	0,699	0,25	0,194	0,774	0,299	0,2519	0,832	0,342	0,3099	0,881	0,382
0,0214	0,404	0,101	0,0793	0,597	0,19	0,1372	0,701	0,251	0,1951	0,775	0,3	0,253	0,833	0,343	0,3109	0,881	0,383
0,0224	0,409	0,103	0,0804	0,599	0,192	0,1383	0,702	0,251	0,1962	0,777	0,3	0,2541	0,834	0,344	0,312	0,882	0,384
0,0235	0,415	0,105	0,0814	0,602	0,193	0,1393	0,704	0,252	0,1972	0,778	0,301	0,2552	0,835	0,345	0,3131	0,883	0,384
0,0257	0,425	0,11	0,0836	0,607	0,196	0,1415	0,706	0,254	0,1994	0,78	0,303	0,2573	0,837	0,346	0,3152	0,885	0,386
0,0267	0,431	0,112	0,0846	0,609	0,197	0,1426	0,708	0,255	0,2005	0,781	0,304	0,2584	0,838	0,347	0,3163	0,886	0,386
0,0278	0,436	0,114	0,0857	0,612	0,198	0,1436	0,709	0,256	0,2015	0,782	0,304	0,2594	0,839	0,348	0,3174	0,887	0,387
0,0289	0,441	0,116	0,0868	0,615	0,2	0,1447	0,71	0,257	0,2026	0,783	0,305	0,2605	0,84	0,349	0,3184	0,887	0,388
0,03	0,447	0,118	0,0879	0,617	0,201	0,1458	0,712	0,258	0,2037	0,784	0,306	0,2616	0,841	0,349	0,3195	0,888	0,389
0,031	0,452	0,12	0,0889	0,619	0,202	0,1468	0,713	0,259	0,2048	0,785	0,307	0,2627	0,842	0,35	0,3206	0,889	0,389
0,0321	0,457	0,122	0,09	0,621	0,203	0,1479	0,715	0,26	0,2058	0,786	0,308	0,2637	0,843	0,351	0,3216	0,89	0,39
0,0332	0,463	0,125	0,0911	0,623	0,204	0,149	0,716	0,261	0,2069	0,787	0,308	0,2648	0,844	0,352	0,3227	0,891	0,391
0,0342	0,467	0,126	0,0922	0,625	0,205	0,1501	0,717	0,261	0,208	0,788	0,309	0,2659	0,845	0,352	0,3238	0,892	0,391
0,0353	0,471	0,128	0,0932	0,627	0,206	0,1511	0,719	0,262	0,209	0,789	0,31	0,267	0,846	0,353	0,3249	0,893	0,392
0,0364	0,474	0,13	0,0943	0,629	0,208	0,1522	0,72	0,263	0,2101	0,79	0,311	0,268	0,847	0,354	0,3259	0,894	0,393
0,0375	0,478	0,132	0,0954	0,631	0,209	0,1533	0,721	0,264	0,2112	0,791	0,312	0,2691	0,848	0,355	0,327	0,894	0,394
0,0385	0,481	0,133	0,0964	0,632	0,21	0,1544	0,723	0,265	0,2123	0,792	0,312	0,2702	0,848	0,355	0,3281	0,895	0,394
0,0396	0,485	0,135	0,0975	0,634	0,211	0,1554	0,724	0,266	0,2133	0,794	0,313	0,2712	0,849	0,356	0,3292	0,896	0,395
0,0407	0,489	0,137	0,0986	0,636	0,212	0,1565	0,726	0,267	0,2144	0,795	0,314	0,2723	0,85	0,357	0,3302	0,897	0,396
0,0418	0,492	0,139	0,0997	0,638	0,213	0,1576	0,727	0,268	0,2155	0,796	0,315	0,2734	0,851	0,357	0,3313	0,898	0,397
0,0428	0,496	0,14	0,1007	0,64	0,214	0,1586	0,728	0,269	0,2166	0,797	0,316	0,2745	0,852	0,358	0,3324	0,899	0,397
0,0439	0,5	0,142	0,1018	0,642	0,215	0,1597	0,73	0,27	0,2176	0,798	0,317	0,2755	0,853	0,359	0,3334	0,9	0,398
0,045	0,503	0,144	0,1029	0,644	0,216	0,1608	0,731	0,27	0,2187	0,799	0,317	0,2766	0,854	0,36	0,3345	0,9	0,399
0,046	0,507	0,146	0,104	0,646	0,217	0,1619	0,733	0,271	0,2198	0,8	0,318	0,2777	0,854	0,36	0,3356	0,901	0,399
0,0471	0,511	0,147	0,105	0,648	0,219	0,1629	0,734	0,272	0,2208	0,801	0,319	0,2788	0,855	0,361	0,3367	0,902	0,4
0,0482	0,514	0,149	0,1061	0,65	0,22	0,164	0,735	0,273	0,2219	0,802	0,32	0,2798	0,856	0,362	0,3377	0,903	0,401
0,0493	0,518	0,151	0,1072	0,652	0,221	0,1651	0,737	0,274	0,223	0,803	0,321	0,2809	0,857	0,363	0,3388	0,904	0,401

ANNEXES

0,0503	0,521	0,152	0,1082	0,654	0,222	0,1661	0,738	0,275	0,2241	0,804	0,321	0,282	0,858	0,363	0,3399	0,904	0,402
0,0514	0,524	0,154	0,1093	0,656	0,223	0,1672	0,739	0,276	0,2251	0,805	0,322	0,283	0,859	0,364	0,341	0,905	0,403
0,0525	0,527	0,155	0,1104	0,658	0,224	0,1683	0,741	0,277	0,2262	0,806	0,323	0,2841	0,86	0,365	0,342	0,906	0,403
0,0535	0,53	0,157	0,1115	0,66	0,225	0,1694	0,742	0,278	0,2273	0,807	0,324	0,2852	0,861	0,365	0,3431	0,906	0,404
0,0546	0,533	0,158	0,1125	0,662	0,226	0,1704	0,744	0,279	0,2283	0,808	0,325	0,2863	0,861	0,366	0,3442	0,907	0,405
0,0557	0,536	0,16	0,1136	0,664	0,227	0,1715	0,745	0,28	0,2294	0,809	0,325	0,2873	0,862	0,367	0,3452	0,908	0,405
0,0568	0,539	0,161	0,1147	0,665	0,228	0,1726	0,746	0,28	0,2305	0,811	0,326	0,2884	0,863	0,368	0,3463	0,909	0,406
0,0578	0,542	0,163	0,1157	0,667	0,229	0,1737	0,748	0,281	0,2316	0,812	0,327	0,2895	0,864	0,368	0,3474	0,909	0,407
0,0589	0,545	0,164	0,1168	0,669	0,23	0,1747	0,749	0,282	0,2326	0,813	0,328	0,2905	0,865	0,369	0,3485	0,91	0,407
Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh
0,3495	0,911	0,408	0,4074	0,949	0,444	0,4653	0,981	0,479	0,5233	1,01	0,514	0,5812	1,036	0,548	0,6391	1,059	0,581
0,3506	0,911	0,409	0,4085	0,949	0,445	0,4664	0,982	0,48	0,5243	1,011	0,514	0,5822	1,037	0,548	0,6402	1,059	0,582
0,3517	0,912	0,409	0,4096	0,95	0,445	0,4675	0,982	0,481	0,5254	1,011	0,515	0,5833	1,037	0,549	0,6412	1,059	0,583
0,3527	0,913	0,41	0,4107	0,951	0,446	0,4686	0,983	0,481	0,5265	1,012	0,516	0,5844	1,038	0,549	0,6423	1,06	0,583
0,3538	0,913	0,411	0,4117	0,952	0,447	0,4696	0,984	0,482	0,5275	1,012	0,516	0,5855	1,038	0,55	0,6434	1,06	0,584
0,3549	0,914	0,411	0,4128	0,952	0,447	0,4707	0,984	0,482	0,5286	1,013	0,517	0,5865	1,038	0,551	0,6444	1,061	0,584
0,356	0,915	0,412	0,4139	0,953	0,448	0,4718	0,985	0,483	0,5297	1,013	0,518	0,5876	1,039	0,551	0,6455	1,061	0,585
0,357	0,916	0,413	0,4149	0,954	0,449	0,4729	0,985	0,484	0,5308	1,014	0,518	0,5887	1,039	0,552	0,6466	1,062	0,586
0,3581	0,916	0,413	0,416	0,954	0,449	0,4739	0,986	0,484	0,5318	1,014	0,519	0,5897	1,04	0,553	0,6477	1,062	0,586
0,3592	0,917	0,414	0,4171	0,955	0,45	0,475	0,987	0,485	0,5329	1,015	0,519	0,5908	1,04	0,553	0,6487	1,062	0,587
0,3603	0,918	0,415	0,4182	0,956	0,451	0,4761	0,987	0,486	0,534	1,015	0,52	0,5919	1,041	0,554	0,6498	1,063	0,588
0,3613	0,918	0,415	0,4192	0,956	0,451	0,4771	0,988	0,486	0,5351	1,016	0,521	0,593	1,041	0,554	0,6509	1,063	0,588
0,3624	0,919	0,416	0,4203	0,957	0,452	0,4782	0,988	0,487	0,5361	1,016	0,521	0,594	1,041	0,555	0,6519	1,064	0,589
0,3635	0,92	0,417	0,4214	0,957	0,453	0,4793	0,989	0,488	0,5372	1,017	0,522	0,5951	1,042	0,556	0,653	1,064	0,589
0,3645	0,921	0,417	0,4225	0,958	0,453	0,4804	0,989	0,488	0,5383	1,017	0,523	0,5962	1,042	0,556	0,6541	1,064	0,59
0,3656	0,921	0,418	0,4235	0,959	0,454	0,4814	0,99	0,489	0,5393	1,018	0,523	0,5973	1,043	0,557	0,6552	1,065	0,591
0,3667	0,922	0,419	0,4246	0,959	0,455	0,4825	0,991	0,49	0,5404	1,018	0,524	0,5983	1,043	0,558	0,6562	1,065	0,591
0,3678	0,923	0,419	0,4257	0,96	0,455	0,4836	0,991	0,49	0,5415	1,019	0,524	0,5994	1,043	0,558	0,6573	1,066	0,592
0,3688	0,923	0,42	0,4267	0,96	0,456	0,4847	0,992	0,491	0,5426	1,019	0,525	0,6005	1,044	0,559	0,6584	1,066	0,592
0,3699	0,924	0,421	0,4278	0,961	0,457	0,4857	0,992	0,492	0,5436	1,02	0,526	0,6015	1,044	0,559	0,6595	1,066	0,593
0,371	0,925	0,421	0,4289	0,962	0,457	0,4868	0,993	0,492	0,5447	1,02	0,526	0,6026	1,045	0,56	0,6605	1,067	0,594
0,3721	0,925	0,422	0,43	0,962	0,458	0,4879	0,994	0,493	0,5458	1,02	0,527	0,6037	1,045	0,561	0,6616	1,067	0,594
0,3731	0,926	0,423	0,431	0,963	0,459	0,4889	0,994	0,494	0,5469	1,021	0,528	0,6048	1,045	0,561	0,6627	1,068	0,595
0,3742	0,927	0,423	0,4321	0,963	0,459	0,49	0,995	0,494	0,5479	1,021	0,528	0,6058	1,046	0,562	0,6637	1,068	0,596
0,3753	0,928	0,424	0,4332	0,964	0,46	0,4911	0,995	0,495	0,549	1,022	0,529	0,6069	1,046	0,563	0,6648	1,069	0,596
0,3763	0,928	0,425	0,4342	0,964	0,46	0,4922	0,996	0,495	0,5501	1,022	0,529	0,608	1,047	0,563	0,6659	1,069	0,597
0,3774	0,929	0,425	0,4353	0,965	0,461	0,4932	0,996	0,496	0,5511	1,023	0,53	0,6091	1,047	0,564	0,667	1,069	0,597
0,3785	0,93	0,426	0,4364	0,966	0,462	0,4943	0,997	0,497	0,5522	1,023	0,531	0,6101	1,048	0,564	0,668	1,07	0,598
0,3796	0,93	0,427	0,4375	0,966	0,462	0,4954	0,998	0,497	0,5533	1,024	0,531	0,6112	1,048	0,565	0,6691	1,07	0,599
0,3806	0,931	0,427	0,4385	0,967	0,463	0,4964	0,998	0,498	0,5544	1,024	0,532	0,6123	1,048	0,566	0,6702	1,071	0,599
0,3817	0,932	0,428	0,4396	0,967	0,464	0,4975	0,999	0,499	0,5554	1,025	0,533	0,6133	1,049	0,566	0,6713	1,071	0,6
0,3828	0,933	0,429	0,4407	0,968	0,464	0,4986	0,999	0,499	0,5565	1,025	0,533	0,6144	1,049	0,567	0,6723	1,071	0,601
0,3838	0,933	0,429	0,4418	0,969	0,465	0,4997	1	0,5	0,5576	1,026	0,534	0,6155	1,05	0,568	0,6734	1,072	0,601
0,3849	0,934	0,43	0,4428	0,969	0,466	0,5007	1	0,501	0,5586	1,026	0,534	0,6166	1,05	0,568	0,6745	1,072	0,602
0,386	0,935	0,431	0,4439	0,97	0,466	0,5018	1,001	0,501	0,5597	1,027	0,535	0,6176	1,05	0,569	0,6755	1,072	0,603
0,3871	0,935	0,431	0,445	0,97	0,467	0,5029	1,001	0,502	0,5608	1,027	0,536	0,6187	1,051	0,569	0,6766	1,073	0,603

ANNEXES

0,3881	0,936	0,432	0,446	0,971	0,468	0,504	1,002	0,502	0,5619	1,028	0,536	0,6198	1,051	0,57	0,6777	1,073	0,604
0,3892	0,937	0,433	0,4471	0,971	0,468	0,505	1,002	0,503	0,5629	1,028	0,537	0,6208	1,052	0,571	0,6788	1,073	0,604
0,3903	0,937	0,433	0,4482	0,972	0,469	0,5061	1,003	0,504	0,564	1,029	0,538	0,6219	1,052	0,571	0,6798	1,074	0,605
0,3914	0,938	0,434	0,4493	0,973	0,47	0,5072	1,003	0,504	0,5651	1,029	0,538	0,623	1,052	0,572	0,6809	1,074	0,606
0,3924	0,939	0,435	0,4503	0,973	0,47	0,5082	1,004	0,505	0,5662	1,03	0,539	0,6241	1,053	0,573	0,682	1,075	0,606
0,3935	0,94	0,435	0,4514	0,974	0,471	0,5093	1,004	0,506	0,5672	1,03	0,539	0,6251	1,053	0,573	0,683	1,075	0,607
0,3946	0,94	0,436	0,4525	0,974	0,471	0,5104	1,005	0,506	0,5683	1,03	0,54	0,6262	1,054	0,574	0,6841	1,075	0,608
0,3956	0,941	0,437	0,4536	0,975	0,472	0,5115	1,005	0,507	0,5694	1,031	0,541	0,6273	1,054	0,574	0,6852	1,076	0,608
0,3967	0,942	0,437	0,4546	0,976	0,473	0,5125	1,006	0,507	0,5704	1,031	0,541	0,6284	1,055	0,575	0,6863	1,076	0,609
0,3978	0,942	0,438	0,4557	0,976	0,473	0,5136	1,006	0,508	0,5715	1,032	0,542	0,6294	1,055	0,576	0,6873	1,076	0,61
0,3989	0,943	0,439	0,4568	0,977	0,474	0,5147	1,007	0,509	0,5726	1,032	0,543	0,6305	1,055	0,576	0,6884	1,077	0,61
0,3999	0,944	0,439	0,4578	0,977	0,475	0,5158	1,007	0,509	0,5737	1,033	0,543	0,6316	1,056	0,577	0,6895	1,077	0,611
0,401	0,945	0,44	0,4589	0,978	0,475	0,5168	1,008	0,51	0,5747	1,033	0,544	0,6326	1,056	0,578	0,6906	1,077	0,612
0,4021	0,945	0,441	0,46	0,978	0,476	0,5179	1,008	0,511	0,5758	1,034	0,544	0,6337	1,057	0,578	0,6916	1,078	0,612
0,4032	0,946	0,441	0,4611	0,979	0,477	0,519	1,009	0,511	0,5769	1,034	0,545	0,6348	1,057	0,579	0,6927	1,078	0,613
0,4042	0,947	0,442	0,4621	0,98	0,477	0,52	1,009	0,512	0,578	1,035	0,546	0,6359	1,057	0,579	0,6938	1,079	0,613
0,4053	0,947	0,443	0,4632	0,98	0,478	0,5211	1,01	0,513	0,579	1,035	0,546	0,6369	1,058	0,58	0,6948	1,079	0,614
0,4064	0,948	0,443	0,4643	0,981	0,479	0,5222	1,01	0,513	0,5801	1,036	0,547	0,638	1,058	0,581	0,6959	1,079	0,615
Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh	Rq	Rv	Rh
0,697	1,08	0,615	0,755	1,099	0,65	0,813	1,114	0,685	0,871	1,126	0,723	0,929	1,135	0,763	0,987	1,139	0,81
0,698	1,08	0,616	0,756	1,099	0,651	0,814	1,115	0,685	0,872	1,126	0,723	0,93	1,135	0,764	0,988	1,139	0,811
0,699	1,08	0,617	0,757	1,1	0,651	0,815	1,115	0,686	0,873	1,126	0,724	0,931	1,136	0,764	0,989	1,139	0,812
0,7	1,081	0,617	0,758	1,1	0,652	0,816	1,115	0,687	0,874	1,126	0,725	0,932	1,136	0,765	0,99	1,139	0,813
0,701	1,081	0,618	0,759	1,1	0,653	0,817	1,115	0,687	0,875	1,126	0,726	0,933	1,136	0,766	0,991	1,139	0,813
0,702	1,081	0,619	0,76	1,1	0,653	0,818	1,116	0,688	0,876	1,126	0,726	0,934	1,136	0,767	0,992	1,139	0,814
0,703	1,082	0,619	0,761	1,101	0,654	0,819	1,116	0,689	0,877	1,126	0,727	0,935	1,137	0,767	0,993	1,139	0,815
0,705	1,082	0,62	0,762	1,101	0,654	0,82	1,116	0,689	0,878	1,127	0,728	0,936	1,137	0,768	0,994	1,139	0,816
0,706	1,082	0,62	0,764	1,101	0,655	0,821	1,117	0,69	0,879	1,127	0,729	0,937	1,137	0,769	0,995	1,139	0,817
0,707	1,083	0,621	0,765	1,102	0,656	0,823	1,117	0,691	0,88	1,127	0,729	0,938	1,137	0,77	0,996	1,139	0,818
0,708	1,083	0,622	0,766	1,102	0,656	0,824	1,117	0,691	0,881	1,127	0,73	0,939	1,138	0,77	0,997	1,139	0,819
0,709	1,084	0,622	0,767	1,102	0,657	0,825	1,117	0,692	0,883	1,127	0,731	0,94	1,138	0,771	0,998	1,139	0,82
0,71	1,084	0,623	0,768	1,102	0,658	0,826	1,118	0,693	0,884	1,127	0,732	0,942	1,138	0,772	0,999	1,139	0,821
0,711	1,084	0,624	0,769	1,103	0,658	0,827	1,118	0,693	0,885	1,127	0,732	0,943	1,138	0,773	1,001	1,139	0,822
0,712	1,085	0,624	0,77	1,103	0,659	0,828	1,118	0,694	0,886	1,128	0,733	0,944	1,138	0,773	1,002	1,139	0,823
0,713	1,085	0,625	0,771	1,103	0,66	0,829	1,119	0,695	0,887	1,128	0,734	0,945	1,139	0,774	1,003	1,139	0,824
0,714	1,085	0,626	0,772	1,104	0,66	0,83	1,119	0,695	0,888	1,128	0,735	0,946	1,139	0,775	1,004	1,139	0,825
0,715	1,086	0,626	0,773	1,104	0,661	0,831	1,119	0,696	0,889	1,128	0,735	0,947	1,139	0,776	1,005	1,139	0,826
0,716	1,086	0,627	0,774	1,104	0,662	0,832	1,119	0,696	0,89	1,128	0,736	0,948	1,139	0,777	1,006	1,139	0,827
0,717	1,086	0,628	0,775	1,104	0,662	0,833	1,12	0,697	0,891	1,128	0,737	0,949	1,139	0,777	1,007	1,139	0,828
0,718	1,087	0,628	0,776	1,105	0,663	0,834	1,12	0,698	0,892	1,129	0,738	0,95	1,139	0,778	1,008	1,139	0,829
0,72	1,087	0,629	0,777	1,105	0,664	0,835	1,12	0,698	0,893	1,129	0,738	0,951	1,139	0,779	1,009	1,139	0,83
0,721	1,087	0,629	0,779	1,105	0,664	0,836	1,121	0,699	0,894	1,129	0,739	0,952	1,139	0,78	1,01	1,139	0,831
0,722	1,088	0,63	0,78	1,106	0,665	0,838	1,121	0,7	0,895	1,129	0,74	0,953	1,139	0,781	1,011	1,139	0,832
0,723	1,088	0,631	0,781	1,106	0,665	0,839	1,121	0,7	0,897	1,129	0,741	0,954	1,139	0,782	1,012	1,139	0,833
0,724	1,089	0,631	0,782	1,106	0,666	0,84	1,121	0,701	0,898	1,129	0,741	0,955	1,139	0,783	1,013	1,139	0,834
0,725	1,089	0,632	0,783	1,106	0,667	0,841	1,121	0,702	0,899	1,129	0,742	0,957	1,139	0,784	1,014	1,139	0,835

ANNEXES

0,726	1,089	0,633	0,784	1,107	0,667	0,842	1,122	0,703	0,9	1,13	0,743	0,958	1,139	0,785	1,016	1,139	0,836
0,727	1,09	0,633	0,785	1,107	0,668	0,843	1,122	0,703	0,901	1,13	0,744	0,959	1,139	0,786	1,017	1,139	0,837
0,728	1,09	0,634	0,786	1,107	0,669	0,844	1,122	0,704	0,902	1,13	0,744	0,96	1,139	0,787	1,018	1,139	0,838
0,729	1,09	0,635	0,787	1,108	0,669	0,845	1,122	0,705	0,903	1,13	0,745	0,961	1,139	0,788	1,019	1,139	0,839
0,73	1,091	0,635	0,788	1,108	0,67	0,846	1,122	0,706	0,904	1,13	0,746	0,962	1,139	0,789	1,02	1,139	0,84
0,731	1,091	0,636	0,789	1,108	0,671	0,847	1,122	0,706	0,905	1,13	0,747	0,963	1,139	0,789	1,021	1,139	0,841
0,732	1,091	0,636	0,79	1,108	0,671	0,848	1,122	0,707	0,906	1,13	0,747	0,964	1,139	0,79	1,022	1,139	0,842
0,733	1,092	0,637	0,791	1,109	0,672	0,849	1,123	0,708	0,907	1,131	0,748	0,965	1,139	0,791	1,023	1,139	0,843
0,735	1,092	0,638	0,792	1,109	0,673	0,85	1,123	0,709	0,908	1,131	0,749	0,966	1,139	0,792	1,024	1,139	0,844
0,736	1,093	0,638	0,794	1,109	0,673	0,851	1,123	0,709	0,909	1,131	0,75	0,967	1,139	0,793	1,025	1,139	0,845
0,737	1,093	0,639	0,795	1,109	0,674	0,853	1,123	0,71	0,91	1,131	0,75	0,968	1,139	0,794	1,026	1,139	0,846
0,738	1,093	0,64	0,796	1,11	0,674	0,854	1,123	0,711	0,912	1,131	0,751	0,969	1,139	0,795	1,027	1,139	0,847
0,739	1,094	0,64	0,797	1,11	0,675	0,855	1,123	0,712	0,913	1,132	0,752	0,97	1,139	0,796	1,028	1,139	0,848
0,74	1,094	0,641	0,798	1,11	0,676	0,856	1,123	0,712	0,914	1,132	0,753	0,972	1,139	0,797	1,029	1,139	0,849
0,741	1,094	0,642	0,799	1,111	0,676	0,857	1,124	0,713	0,915	1,132	0,753	0,973	1,139	0,798	1,031	1,139	0,85
0,742	1,095	0,642	0,8	1,111	0,677	0,858	1,124	0,714	0,916	1,132	0,754	0,974	1,139	0,799	1,032	1,139	0,851
0,743	1,095	0,643	0,801	1,111	0,678	0,859	1,124	0,715	0,917	1,133	0,755	0,975	1,139	0,8	1,033	1,138	0,853
0,744	1,095	0,644	0,802	1,111	0,678	0,86	1,124	0,715	0,918	1,133	0,756	0,976	1,139	0,8	1,034	1,138	0,854
0,745	1,096	0,644	0,803	1,112	0,679	0,861	1,124	0,716	0,919	1,133	0,756	0,977	1,139	0,801	1,035	1,137	0,856
0,746	1,096	0,645	0,804	1,112	0,68	0,862	1,124	0,717	0,92	1,133	0,757	0,978	1,139	0,802	1,036	1,137	0,857
0,747	1,096	0,645	0,805	1,112	0,68	0,863	1,125	0,718	0,921	1,133	0,758	0,979	1,139	0,803	1,037	1,136	0,859
0,749	1,097	0,646	0,806	1,113	0,681	0,864	1,125	0,718	0,922	1,134	0,758	0,98	1,139	0,804	1,038	1,136	0,86
0,75	1,097	0,647	0,807	1,113	0,682	0,865	1,125	0,719	0,923	1,134	0,759	0,981	1,139	0,805	1,039	1,135	0,862
0,751	1,098	0,647	0,809	1,113	0,682	0,866	1,125	0,72	0,924	1,134	0,76	0,982	1,139	0,806	1,04	1,135	0,863
0,752	1,098	0,648	0,81	1,113	0,683	0,868	1,125	0,721	0,925	1,134	0,761	0,983	1,139	0,807	1,041	1,134	0,864
0,753	1,098	0,649	0,811	1,114	0,684	0,869	1,125	0,721	0,927	1,135	0,761	0,984	1,139	0,808	1,042	1,134	0,866
0,754	1,099	0,649	0,812	1,114	0,684	0,87	1,125	0,722	0,928	1,135	0,762	0,986	1,139	0,809	1,043	1,133	0,86

Rq	Rv	Rh	1,063	1,125	0,896
1,044	1,133	0,869	1,064	1,125	0,897
1,046	1,133	0,87	1,065	1,124	0,899
1,047	1,132	0,872	1,066	1,123	0,902
1,048	1,132	0,873	1,067	1,121	0,905
1,049	1,131	0,875	1,068	1,119	0,909
1,05	1,131	0,876	1,069	1,117	0,913
1,051	1,13	0,878	1,07	1,116	0,916
1,052	1,13	0,879	1,071	1,114	0,92
1,053	1,129	0,881			
1,054	1,129	0,883			
1,055	1,128	0,884			
1,056	1,128	0,886			
1,057	1,127	0,888			
1,058	1,127	0,889			
1,06	1,127	0,891			
1,061	1,126	0,893			
1,062	1,126	0,894			

ANNEXE C

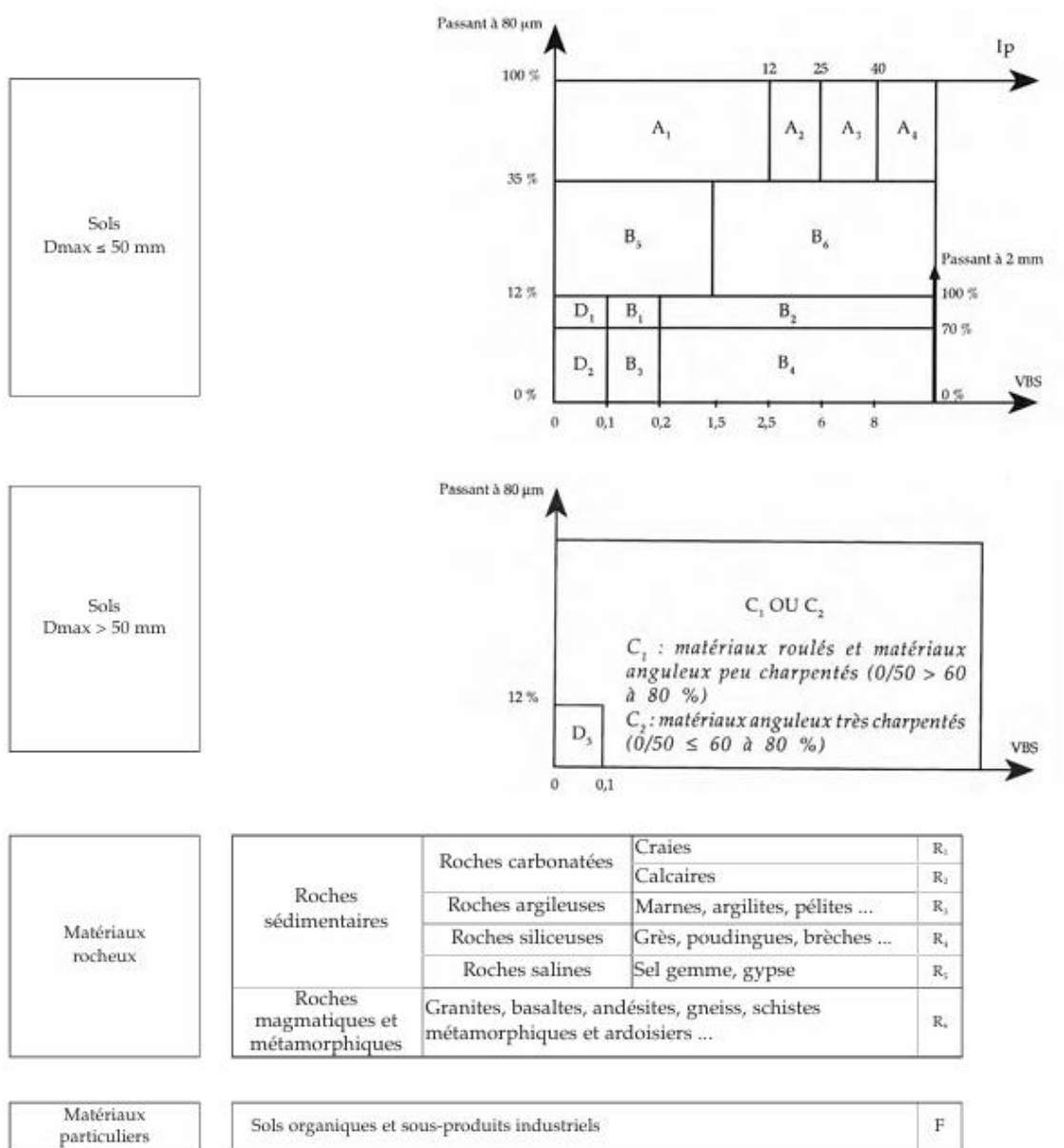
Annexe C1 : La localisation des sondages et essais in -situ réalisés du PK00+000 au PK20+000.

Essais	PK	Profondeur
Sondage carotté		
F-40-B-OK	0+254	12
F-41-B-OK	3+313	35
F-42-B-OK	4+072	40
F-43-B-OK	5+848	45
F-44-B-OK	6+490	20
F-45-B-OK	10+268	20
F-46-B-OK	12+447	40
F-47-B-OK	14+194	100
F-48-B-OK	14+825	40
F-49-B-OK	17+300	20
F-50-B-OK	18+663	20
F-51-B-OK	20+150	30
Puits de renaissance		
PU-32-B-OK	2+350	4
PU-34-B-OK (GITE 05)	11+270	150m de l'axe de tracé
PU-35-B-OK (GITE 06)	2+100	300m de l'axe de tracé
Pénétromètres dynamiques lourd		
PDL-19-B-OK	1+750	Refus
PDL-20-B-OK	12+352	Refus
Pressiomètres		

ANNEXES

SP-29-B-OK	8+891	20
SP-30-B-OK	9+326	20
SP-31-B-OK	11+251	20
SP-32-B-OK	12+190	12
SP-33-B-OK	15+668	20

Annexe C2 : Classification des sols selon GTR



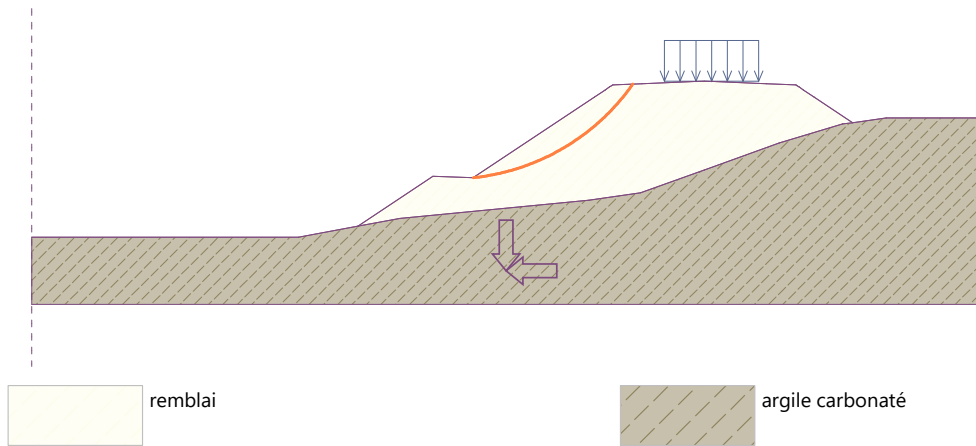
Annexe C3 : Classification des sols selon UIC

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 $30 < \text{LA} \leq 40$	
Classification des sols (identification géotechnique)		Classe de qualité des sols
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 C4 : Etude de stabilité

➤ Stabilité du talus de remblais

Remblais PK00+950



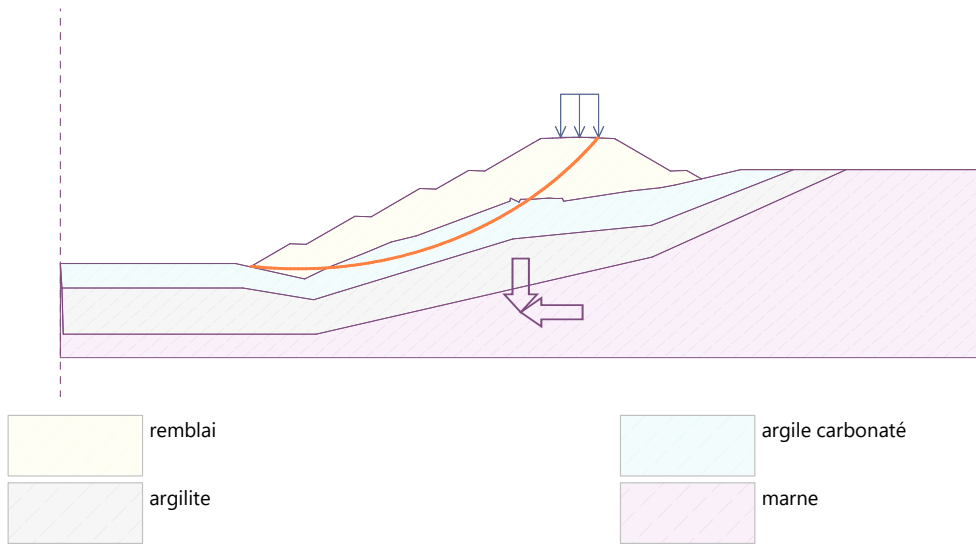
The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces :	$F_a =$	221,88	kN/m
Sum of passive forces :	$F_p =$	279,58	kN/m
Sliding moment :	$M_a =$	3692,11	kNm/m
Resisting moment :	$M_p =$	4652,14	kNm/m

Factor of safety = 1,26 > 1,10

Slope stability ACCEPTABLE

Remblai PK02+907

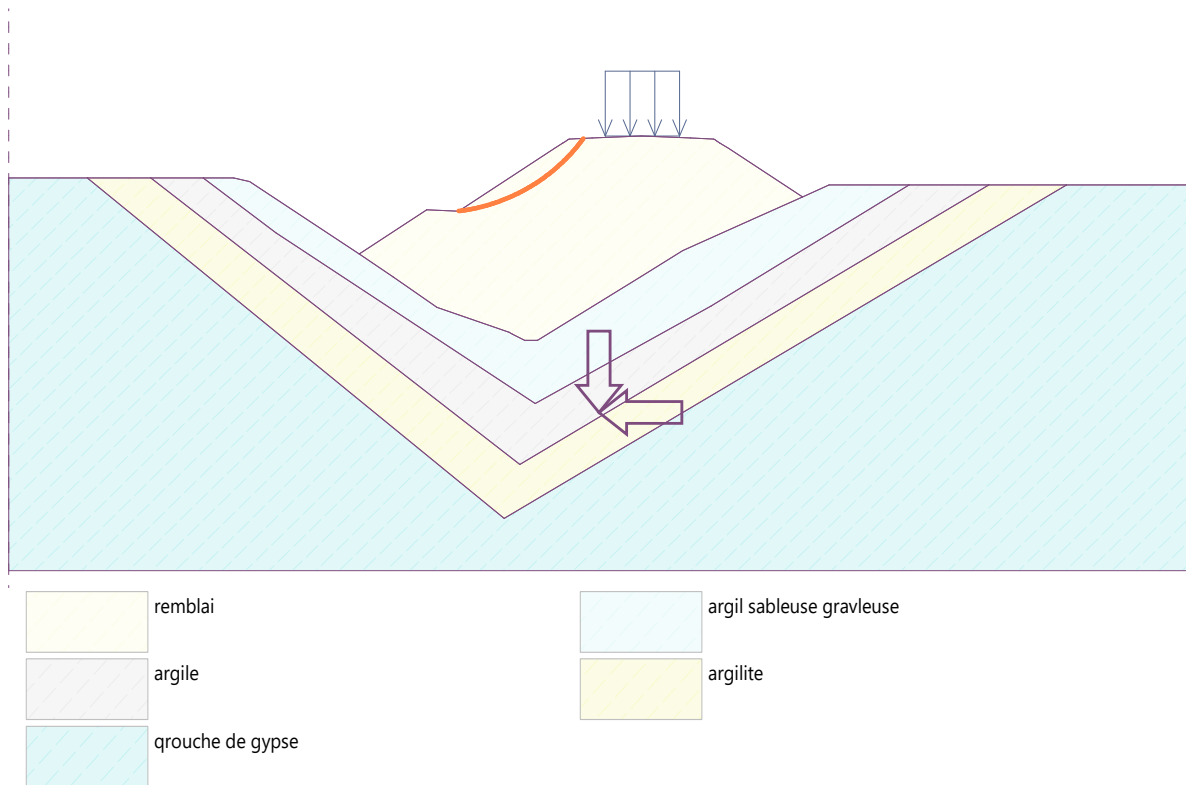
The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces :	$F_a =$	5819,92	kN/m
Sum of passive forces :	$F_p =$	6207,27	kN/m
Sliding moment :	$M_a =$	401807,47	kNm/m
Resisting moment :	$M_p =$	428550,05	kNm/m

Factor of safety = 1,07 < 1,10

Slope stability NOT ACCEPTABLE

Remblai PK05+850

The slip surface after optimization.

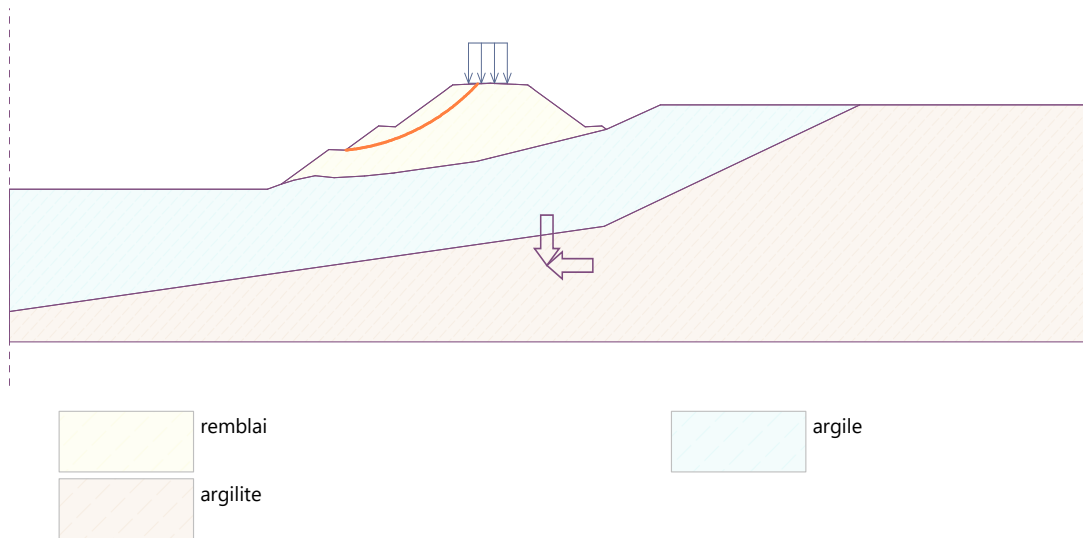
Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces :	$F_a =$	210,33	kN/m
Sum of passive forces :	$F_p =$	265,00	kN/m
Sliding moment :	$M_a =$	3569,24	kNm/m
Resisting moment :	$M_p =$	4497,04	kNm/m

Factor of safety = 1,26 > 1,10

Slope stability ACCEPTABLE

Remblai PK18+050



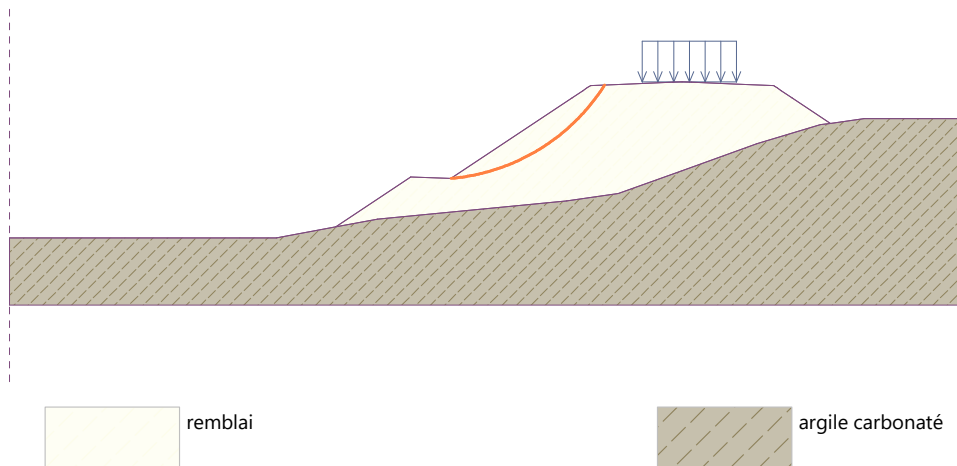
The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces :	$F_a =$	643,04	kN/m
Sum of passive forces :	$F_p =$	844,99	kN/m
Sliding moment :	$M_a =$	25297,17	kNm/m
Resisting moment :	$M_p =$	33241,81	kNm/m

Factor of safety = 1,31 > 1,10

Slope stability ACCEPTABLE

Remblai PK00+950

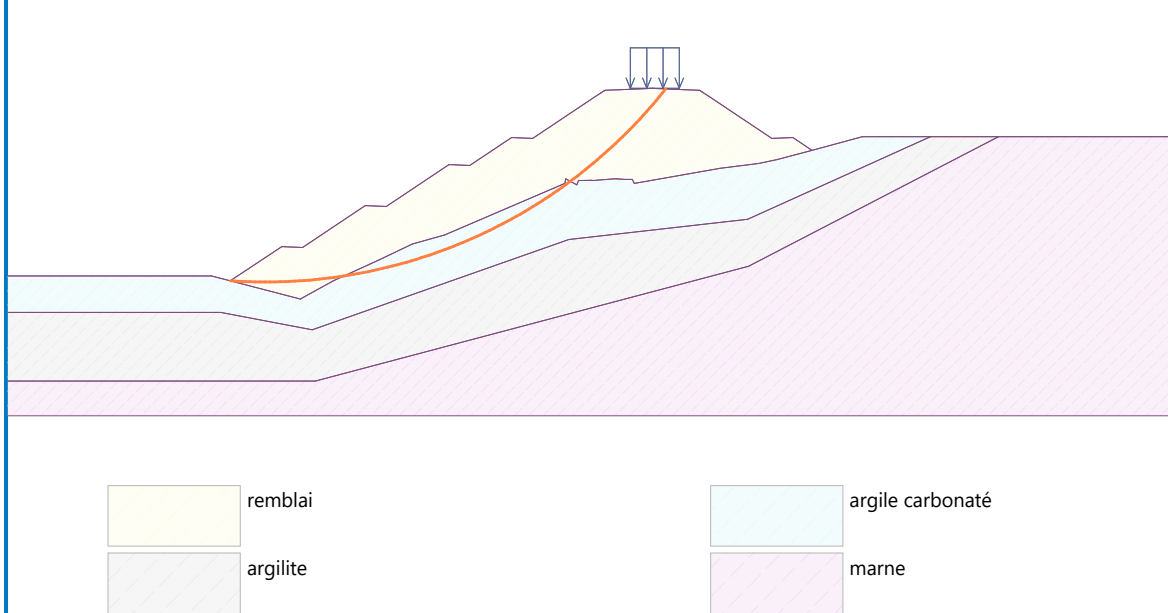
The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces :	$F_a =$	174,78	kN/m
Sum of passive forces :	$F_p =$	269,45	kN/m
Sliding moment :	$M_a =$	2637,38	kNm/m
Resisting moment :	$M_p =$	4066,07	kNm/m

Factor of safety = 1,54 > 1,50

Slope stability ACCEPTABLE

Remblai PK02+907

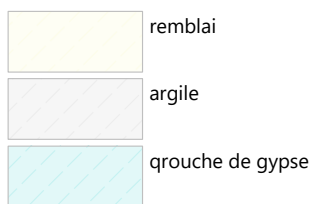
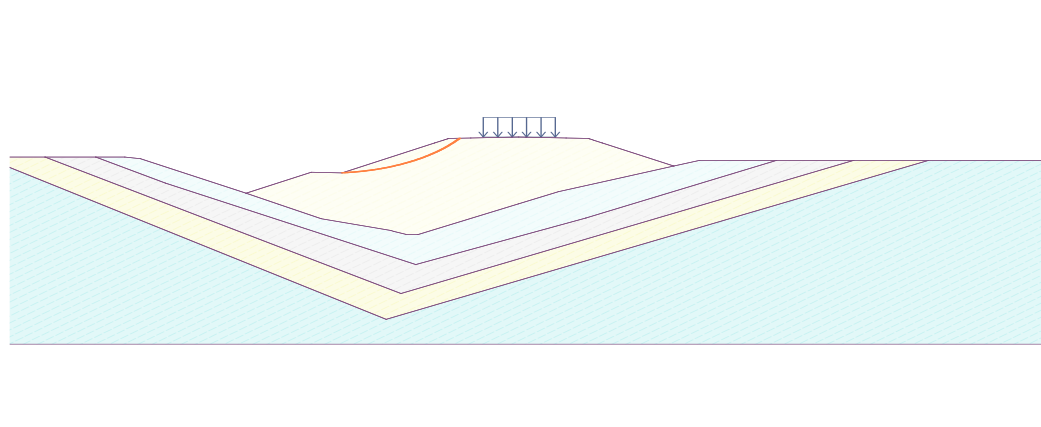
The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces :	$F_a =$	4049,62	kN/m
Sum of passive forces :	$F_p =$	5827,56	kN/m
Sliding moment :	$M_a =$	296594,27	kNm/m
Resisting moment :	$M_p =$	426810,60	kNm/m

Factor of safety = 1,44 < 1,50

Slope stability NOT ACCEPTABLE

Remblais PK05+850

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 174,74$ kN/m

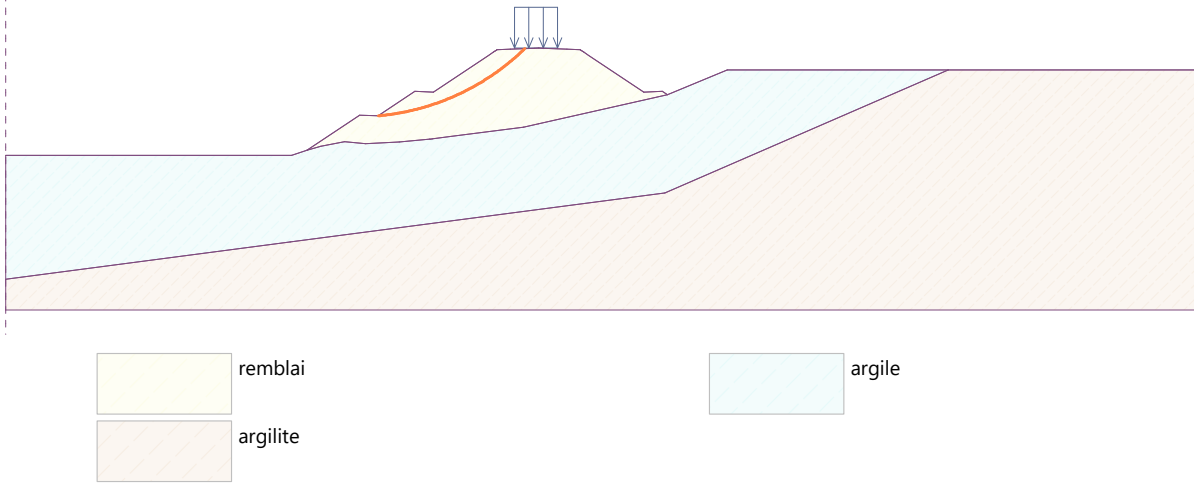
Sum of passive forces : $F_p = 269,43$ kN/m

Sliding moment : $M_a = 2671,82$ kNm/m

Resisting moment : $M_p = 4119,51$ kNm/m

Factor of safety = $1,54 > 1,50$

Slope stability ACCEPTABLE

Remblai PK18+050

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 515,42$ kN/m

Sum of passive forces : $F_p = 856,33$ kN/m

Sliding moment : $M_a = 20276,76$ kNm/m

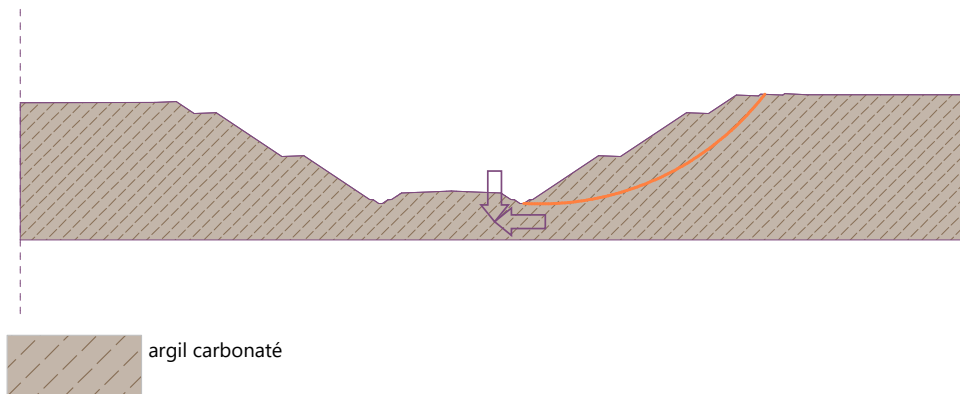
Resisting moment : $M_p = 33687,93$ kNm/m

Factor of safety = $1,66 > 1,50$

Slope stability ACCEPTABLE

➤ Stabilité du talus de déblais

Déblais PK00+100



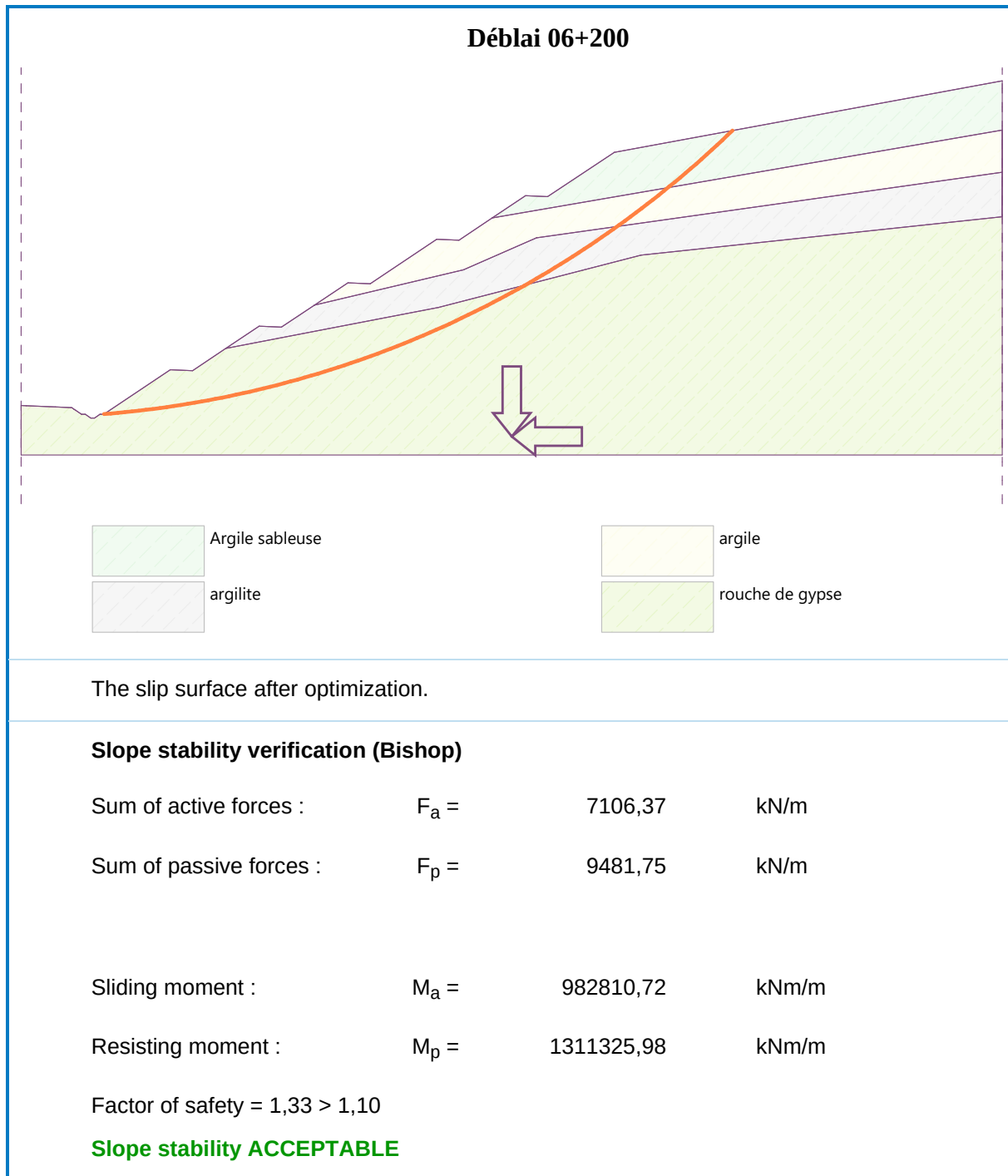
The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces :	$F_a =$	1431,38	kN/m
Sum of passive forces :	$F_p =$	1835,40	kN/m
Sliding moment :	$M_a =$	55566,33	kNm/m
Resisting moment :	$M_p =$	71250,23	kNm/m

Factor of safety = 1,28 > 1,10

Slope stability ACCEPTABLE

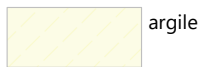
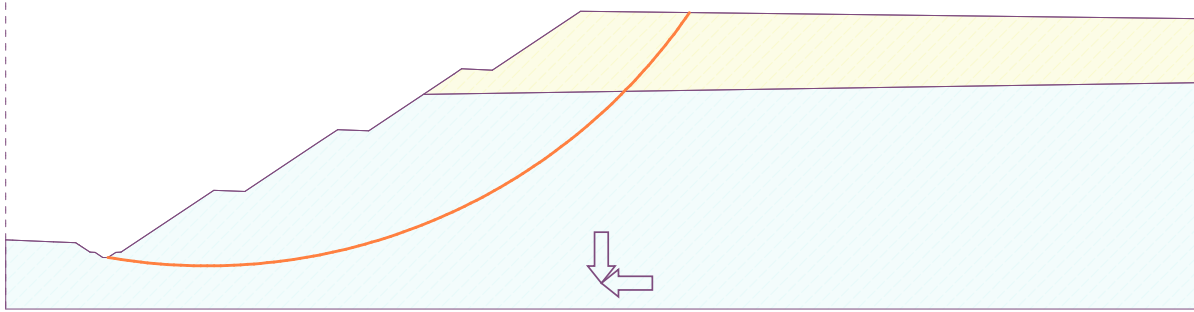


Déblai 11+700

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces :	$F_a =$	15454,27	kN/m
Sum of passive forces :	$F_p =$	17951,22	kN/m
Sliding moment :	$M_a =$	1985409,45	kNm/m
Resisting moment :	$M_p =$	2306193,08	kNm/m
Factor of safety = 1,16 > 1,10			
Slope stability ACCEPTABLE			

Remblai 17+600

argile



argilite

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 4621,79$ kN/m

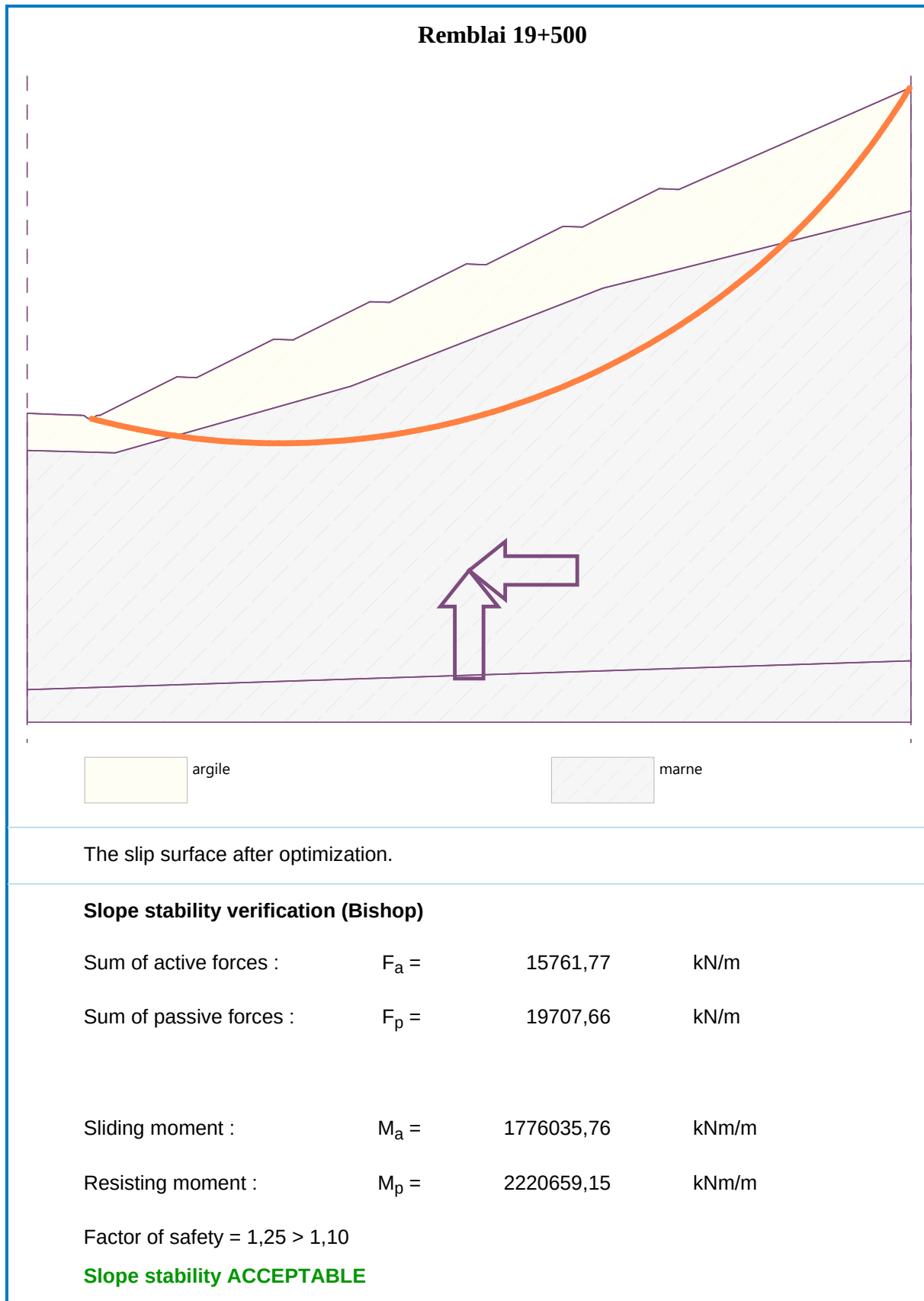
Sum of passive forces : $F_p = 6475,06$ kN/m

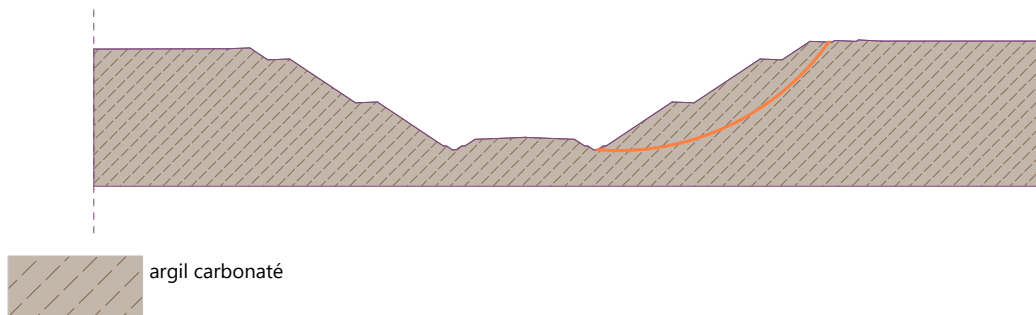
Sliding moment : $M_a = 262471,53$ kNm/m

Resisting moment : $M_p = 367718,56$ kNm/m

Factor of safety = $1,40 > 1,10$

Slope stability ACCEPTABLE



Déblai 00+100

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 1091,35$ kN/m

Sum of passive forces : $F_p = 1772,69$ kN/m

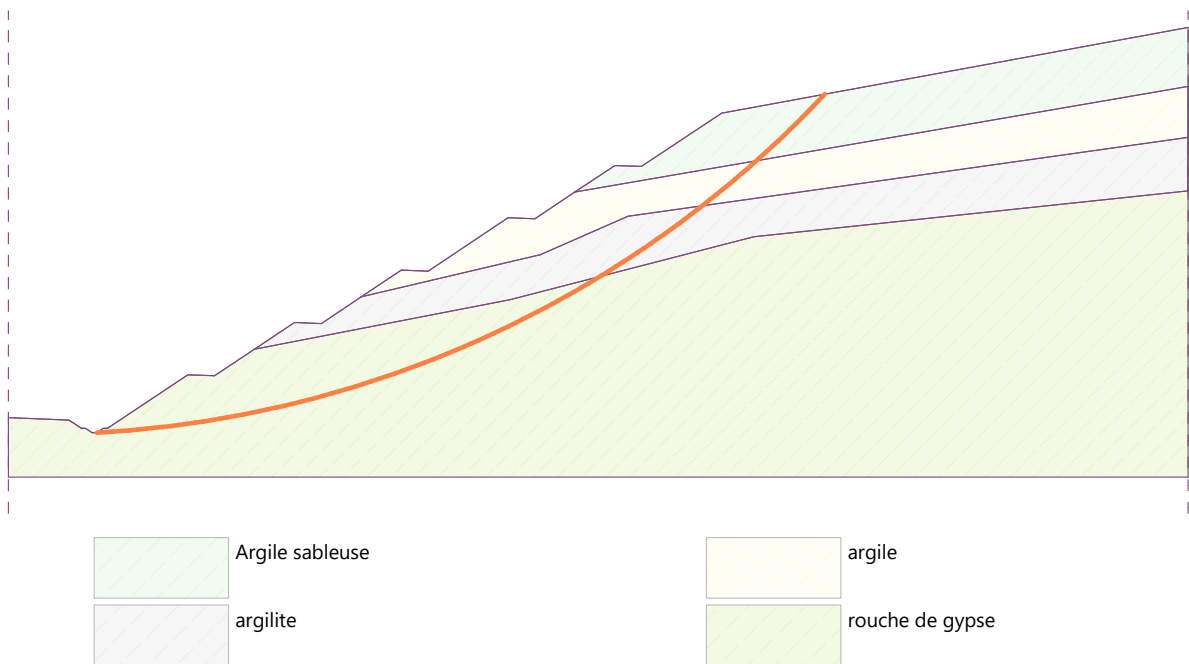
Sliding moment : $M_a = 38491,97$ kNm/m

Resisting moment : $M_p = 62522,69$ kNm/m

Factor of safety = $1,62 > 1,50$

Slope stability ACCEPTABLE

Remblai 06+200



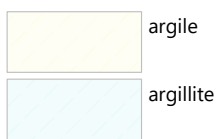
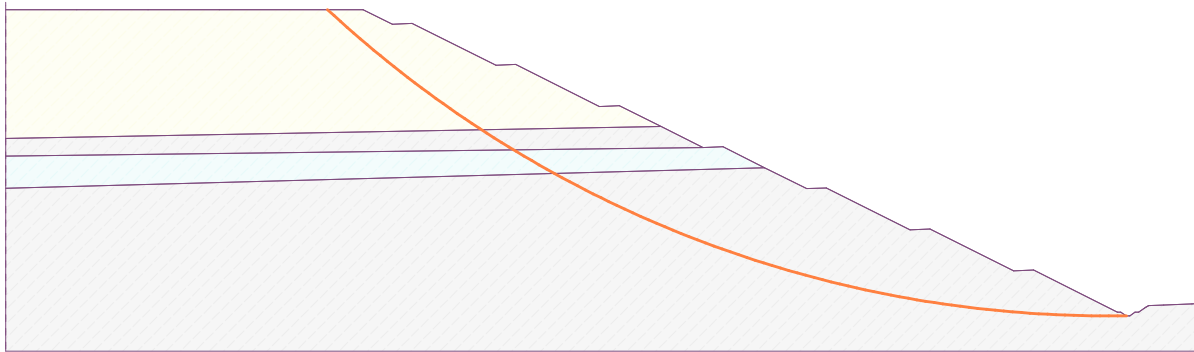
The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces :	$F_a =$	5451,99	kN/m
Sum of passive forces :	$F_p =$	9343,52	kN/m
Sliding moment :	$M_a =$	662252,96	kNm/m
Resisting moment :	$M_p =$	1134957,62	kNm/m

Factor of safety = 1,71 > 1,50

Slope stability ACCEPTABLE

Déblai PK11+700

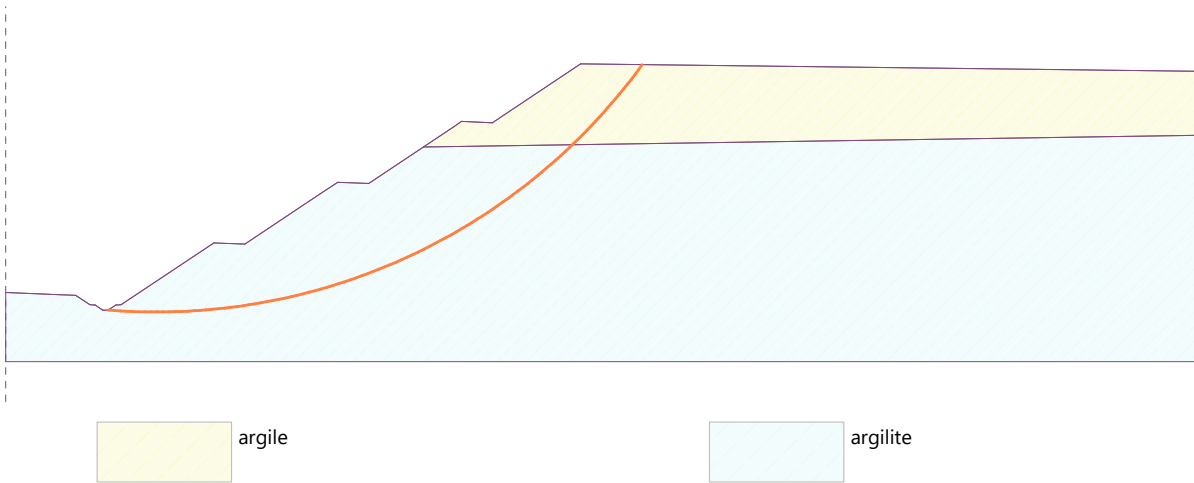
The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces :	$F_a =$	7889,53	kN/m
Sum of passive forces :	$F_p =$	15575,23	kN/m
Sliding moment :	$M_a =$	1273290,99	kNm/m
Resisting moment :	$M_p =$	2513686,43	kNm/m

Factor of safety = 1,97 > 1,50

Slope stability ACCEPTABLE

Déblai PK17+600

The slip surface after optimization.

Slope stability verification (Bishop)

Sum of active forces : $F_a = 2830,97$ kN/m

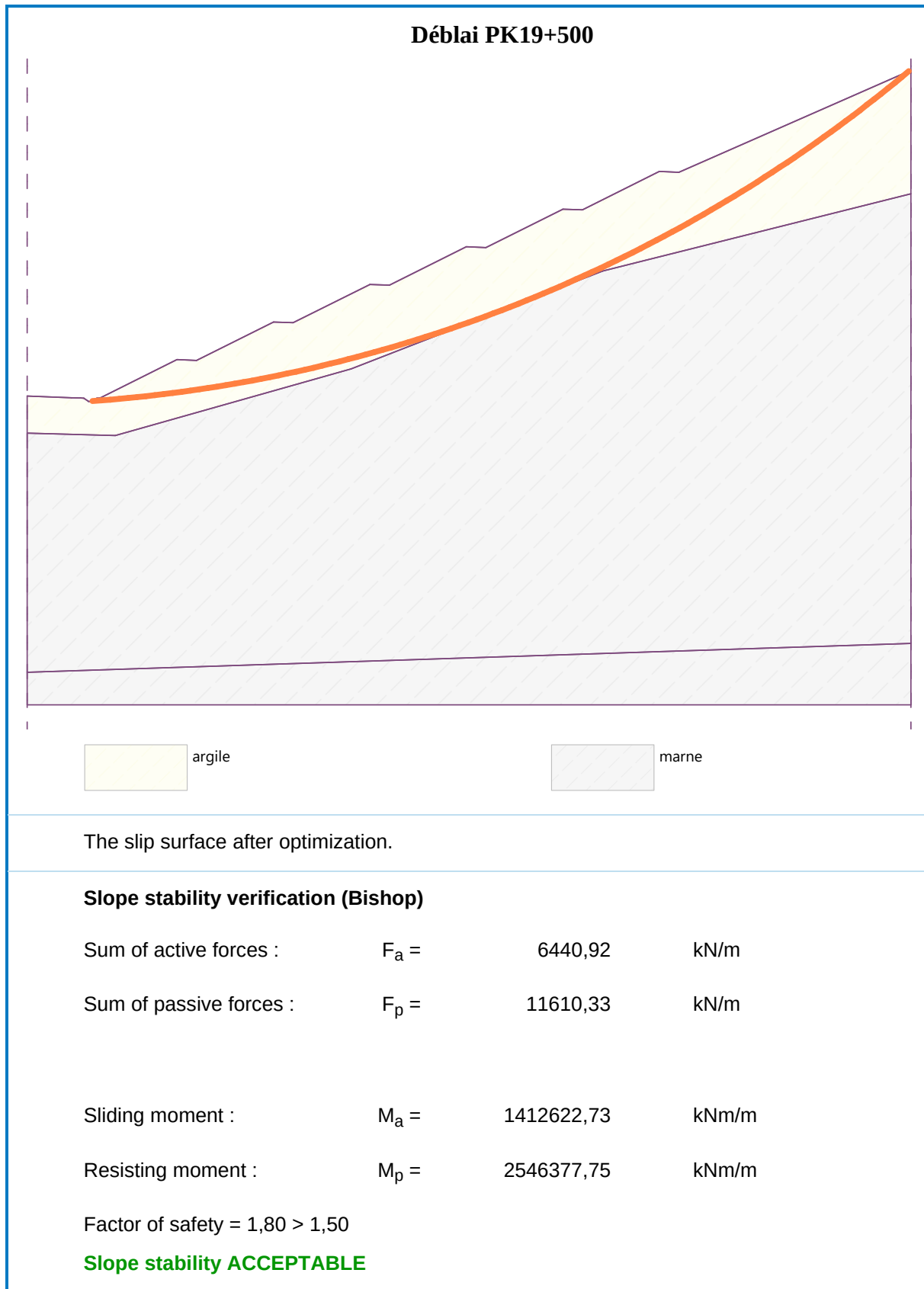
Sum of passive forces : $F_p = 4960,78$ kN/m

Sliding moment : $M_a = 164762,36$ kNm/m

Resisting moment : $M_p = 288717,44$ kNm/m

Factor of safety = $1,75 > 1,50$

Slope stability ACCEPTABLE

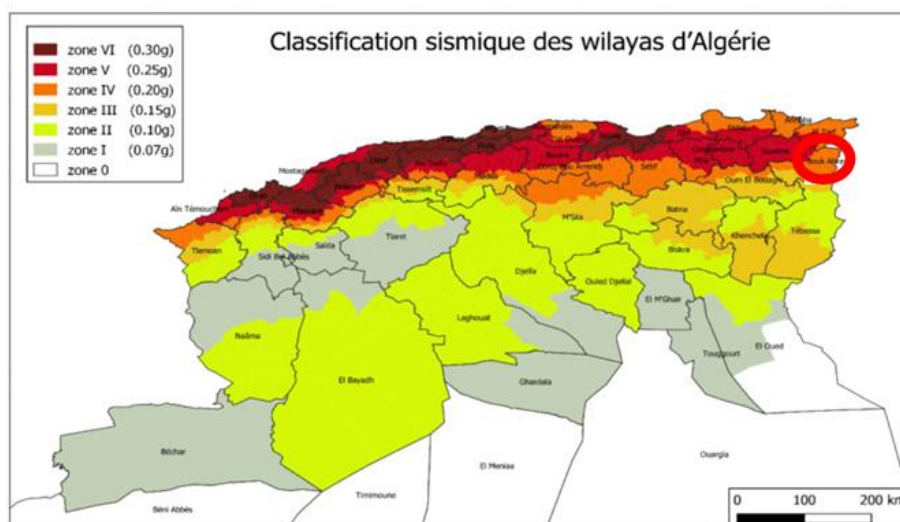


Annexe C5 : Hypothèses géotechniques de calcul

Nature de sol	γ_h	Caractéristiques de cisaillement			
	(KN/m ³)	C _u (KPa)	φ_u (°)	C (KPa)	φ (°)
Remblai ordinaire	20	-	-	5	33
Marne	19	60	18	40	25
Argile	19.3	43	18	24	26
Argile graveleuse	19	22	21.8	15	25
Argile carbonaté jaunâtre	20	25	20	15	25
Argilite	20.5	40	22	25	27
Calcaire	23	114	15	76	25
Roche de gypse	22.2	39.1	19.4	26	30

Annexe C6 : Sismicité

- D'après le zonage sismique établi par la réglementation algérienne, notre région d'étude, située dans la wilaya de Souk Ahras, appartient à la Zone IV, caractérisée par une sismicité moyenne à élevée



ANNEXES

- D'après les résultats des essais pressiométrique, ($Pl = 2-5 \text{ MPa}$; $E_{25} = 20-100 \text{ MPa}$), notre site est classé en S2 site ferme

Spectre	type	I	S	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)
<i>(Zones IV, V et VI)</i>						
site: S_1			1.00	0.10	0.40	2.0
site: S_2			1.20	0.10	0.50	2.0
site: S_3			1.30	0.15	0.60	2.0
site: S_4			1.35	0.15	0.70	2.0

- Le RPA 2024 classe les ouvrages en fonction de leur importance, En considérant le projet faisant partie du Groupe 1B

Coefficient d'importance, I	Groupe d'importance			
	1A	1B	2	3
I	1.40	1.20	1	0.80

- Le coefficient d'accélération moyen « A » à prendre en considération pour le dimensionnement des ouvrages sera $A = 0,15$ le facteur d'importance $I = 1,20$ et le coefficient de site $S=1,2$.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_h = \frac{1}{2} \times A \times I \times S = 0.5 \times 0.15 \times 1.20 \times 1.2 \Rightarrow K_h = 0.108 \\ K_v = \frac{1}{3} \times K_h = \frac{1}{3} \times 0.108 \Rightarrow K_h = \pm 0.0324 \end{array} \right\}$$

Annexe C6 : Matériaux de zone humide

Fiche n° 6 : Matériaux de zone humide

Type de matériau, CiB1, CiB3, D3, R21, R22, R41, R42, R61, R62, F31, F71

[1]

		Observations
désignation	Grave 0/D	
Caractéristiques intrinsèques		
résistance	LA + MDA <= 80	
Caractéristiques de fabrication		
dimensions nominales	d 0	
	D 63 à 500	
granularité (fuseau de spécification)	P[Dmax] >= 99%	
	P[D] [2]	
	P[D/20] <= 12%	
	P[0,08] <= 12%	
angularité		
forme		
propreté	ESP >= 35	
Caractéristiques complémentaires		
sensibilité au gel	non gélif	
dégradabilité	non mesurable	
granulats artificiels	[5]	

[1] Les sols B1, B3, D1 peuvent également être utilisés en matériaux de zone humide, à condition d'être mis en noyau.

Les caractéristiques intrinsèques des sols B1, B3, D1 sont R = LA + MDE <= 80 ou FS <= 60

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

si D > 200 mm : P[D] >= 99% (D = Dmax)

[3] mesuré sur la fraction 0/50

[4] si le pourcentage de passants à 2mm de la fraction 0/50 est supérieur ou égal à 30%

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

Annexe C7 : Matériaux de zone inondable

Fiche n° 7 : Matériaux de zone inondable

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

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

[2]

[1] si $D \leq 200 \text{ mm}$: $P[D] = 99 \text{ à } 85 \%$ ($D_{\text{max}} = 1,25 D$)
 si $D > 200 \text{ mm}$: $P[D] \geq 99 \%$ ($D = D_{\text{max}}$)

[2] mesuré sur la fraction 0/50

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

ANNEXES

Annexe C8 : Condition d'utilisation des matériaux en remblai

Sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en remblai	Code
					E G W T R C H
A₂m	Ces sols ne posent pas de problème de réutilisation en remblai sauf par pluie forte ou moyenne	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON
		+	pluie faible	E : extraction frontale C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	2 0 0 0 0 2 2
		=	ni pluie, ni évaporation importante	C : compactage moyen	0 0 0 0 0 2 0
		-	évaporation importante	Solution 1 : arrosage superficiel W : arrosage superficiel pour maintien de l'état C : compactage moyen	0 0 3 0 0 2 0
				Solution 2 : emploi en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 0 0 0 1 2
				Solution 3 : extraction frontale E : extraction frontale C : compactage intense	2 0 0 0 0 1 0

R₂₃ R₄₃ R₆₃	Matériaux rocheux "destructurés", évoluant en cours de chantier vers un sol fin souvent sensible à l'eau	Les conditions dépendent de la nature et de l'état du sol obtenu en chantier. A priori, ces matériaux peuvent se classer : - pour R₂₃ : principalement en C₂Bi ou D₃ - pour R₄₃ : principalement en C₁Bi, Bi, D₁ ou D₂ - pour R₆₃ : toutes classes possibles Dans chaque cas le géotechnicien doit préciser le sol le plus probable auquel on aboutit en fin de mise en œuvre On se référera alors aux conditions d'utilisation de ce sol en y ajoutant systématiquement l'obligation d'une fragmentation complémentaire			
---	--	---	--	--	--

D

Sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en remblai	Code
					E G W T R C H
D₁	Ces sols peuvent poser, surtout si leur granulométrie est uniforme, des problèmes de traficabilité	++ + = -	toutes situations météorologiques	C : compactage moyen	0 0 0 0 0 2 0
	Pour limiter ces problèmes un arrosage peut s'avérer efficace				
D₂ D₃	Ces sols constituent les meilleurs matériaux de construction des remblais				

ANNEXE D

Annexe D1 : Les épaisseurs minimales de la couche d'assise selon UIC719R

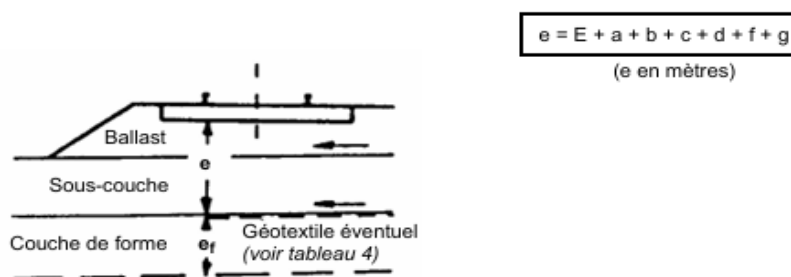


Fig. 9 - Calcul de l'épaisseur minimale "e" des couches d'assise

E	= 0,70 m	pour les plates-formes de classe de portance P1 ^a
E	= 0,55 m	pour les plates-formes de classe de portance P2 ^a
E	= 0,45 m	pour les plates-formes de classe de portance P3 ^a
a	= 0	pour les groupes UIC 1 et 2 (ou lignes à V > 160 km/h, quel que soit le groupe UIC) ^b
a	= - 0,05 m	pour les groupes UIC 3 et 4 ^b
a	= - 0,10 m	pour les groupes UIC 5 et 6 ^b
b	= 0	pour les traverses bois de longueur 2,60 m
b	= $\frac{2,50 - L}{2}$	pour les traverses béton de longueur L (b en m, L en m, b peut être négatif si L > 2,50 m)
c	= 0	pour un dimensionnement normal
c	= - 0,10 m	à titre exceptionnel pour des opérations difficiles sur les lignes existantes de groupe UIC autres que "7, 8, 9 sans voyageur" ^b
d	= 0	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 200 kN
d	= + 0,05 m	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 225 kN
d	= + 0,12 m	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 250 kN
f	= 0	pour toutes les lignes parcourues à V ≤ 160 km/h et pour les plates-formes de portance P3 des lignes parcourues à grande vitesse ^a
f	= + 0,05 m	pour les plates-formes de classe de portance P2 des lignes parcourues à grande vitesse ^a
f	= + 0,10 m	pour les plates-formes de classe de portance P1 des lignes parcourues à grande vitesse ^a
g	= +	géotextile lorsque la couche de forme est en sol QS1 ou QS2 ^c
g	= 0	(pas de géotextile) lorsque la couche de forme est en sol QS3 ^c

a. Les classes de portance des plates-formes sont définies au tableau 4.

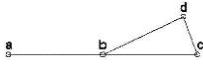
b. Les groupes UIC sont définis dans la fiche n° 714 (édition du 01.01.89) (voir Bibliographie).

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

ANNEXE E

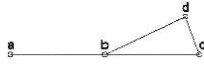
Annexe E1 : Implantation des appareils de voie

(1) ADV 60 E1-500-1/12 DG



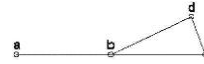
	X	Y
a	403613.3659	4019148.9013
b	403599.2156	4019164.1403
c	403585.0654	4019179.3792
d	403583.8487	4019178.1515

(2) ADV 60 E1-500-1/12 DG



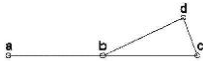
	X	Y
a	403540.5335	4019219.9892
b	403554.7249	4019204.7060
c	403568.8340	4019189.5113
d	403570.0471	4019190.7355

(3) ADV 60 E1-500-1/12 DD



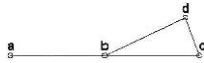
	X	Y
a	403536.4508	4019224.3860
b	403522.3006	4019239.6250
c	403508.1503	4019254.8639
d	403509.4647	4019255.9864

(4) ADV 60 E1-500-1/12 DD



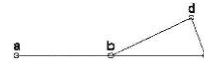
	X	Y
a	403470.9876	4019302.2341
b	403485.1378	4019286.9951
c	403499.2881	4019271.7562
d	403497.9737	4019270.6337

(5) ADV 60 E1-500-1/12 DD



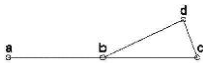
	X	Y
a	403466.9049	4019306.6309
b	403452.7546	4019321.8698
c	403438.6044	4019337.1088
d	403439.9188	4019338.2313

(6) ADV 60 E1-500-1/12 DG



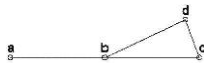
	X	Y
a	403344.1614	4019431.4771
b	403330.0112	4019446.7161
c	403315.8609	4019461.9550
d	403314.6443	4019460.7273

(7) ADV 60 E1-300-1/9 DG



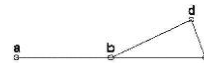
	X	Y
a	403310.2110	4019464.7704
b	403297.9353	4019475.9657
c	403285.6596	4019487.1610
d	403284.4984	4019485.7369

(8) ADV 60 E1-500-1/9 DD



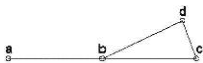
	X	Y
a	402849.5253	4020105.5922
b	402856.6873	4020090.6010
c	402863.8492	4020075.6098
d	402862.1499	4020074.9106

(9) ADV 60 E1-500-1/12 DD



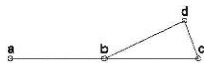
	X	Y
a	402827.4826	4020147.7251
b	402838.0886	4020129.5310
c	402848.4277	4020111.7950
d	402846.9388	4020111.0060

(10) ADV 60 E1-500-1/12 DG



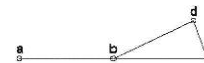
	X	Y
a	402831.8022	4020150.2432
b	402842.2752	4020132.2773
c	402852.7482	4020114.3115
d	402854.2040	4020115.2433

(11) ADV 60 E1-500-1/12 DD



	X	Y
a	402824.4608	4020152.9086
b	402813.9878	4020170.8745
c	402803.5148	4020188.8403
d	402805.0430	4020189.6480

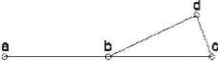
(12) ADV 60 E1-500-1/12 DD



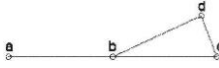
	X	Y
a	402777.6182	4020243.1926
b	402788.0912	4020225.2267
c	402798.5642	4020207.2609
d	402797.0361	4020206.4532

ANNEXES

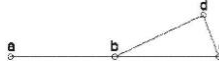
(13) ADV 60 E1-500-1/12 DG

		
	X	Y
a	402774.5965	4020248.3761
b	402764.1277	4020266.3346
c	402753.6404	4020284.3078
d	402752.1946	4020283.3760

(14) ADV 60 E1-500-1/12 DG

		
	X	Y
a	402719.1179	4020333.6180
b	402729.5910	4020315.6521
c	402740.0640	4020297.6863
d	402741.5198	4020298.6181

(15) ADV 60 E1-500-1/12 DD

		
	X	Y
a	403364.2789	4019431.8491
b	403378.4291	4019416.6101
c	403392.5794	4019401.3712
d	403391.2650	4019400.2487

Annexe E2 : Les coordonnées des Garages franc

GF N°	PK	X	Y
1	01+487.42	403568.1050	4019194.9694
2	01+514.88	403585.7943	4019173.9211
3	01+379.77	403493.8577	4019272.9313
4	01+407.29	403513.5807	4019253.6888
5	01+272.18	403424.3118	4019355.1761
6	01+097.17	403298.9006	4019477.5452
7	01+064.91	403272.3008	4019496.8686
8	00+372.00	402869.2735	4020060.0127
9	00+339.73	402858.4809	4020091.0690
10	00+339.73	402865.8864	4020095.3881
11	00+204.62	402793.5217	4020209.5971
12	00+232.14	402808.5573	4020186.5041
13	00+097.03	402740.5123	4020303.2312
14	00+124.56	402753.2021	4020278.7629
15	01+239.51	403406.8720	4019383.3038

ANNEXES

Annexe E3 : Implantation des quais et heurtoir

1 2 3 4	Cordonnées	
	X	Y
Quai A		
1	402976.7531	4019852.0323
2	403121.7294	4019644.9934
3	403115.5798	4019639.8766
4	402969.8417	4019848.0033
Quai B		
1	402992.5973	4019861.2510
2	403135.8005	4019656.7014
3	403128.1135	4019650.3054
4	402983.9280	4019856.2148

Implantation du heurtoir	PK	X	Y
Heurtoir 1	01+539.88	403612.3936	4019164.6447