République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المـــدرســـة الوطنيـــة العليـــا لألشغـال العموميـة
فرنســيس جانســون
École 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 la ligne ferroviaire BOUCHEGOUF-SOUK AHRAS du (Pk 54+000 au Pk 64+000) avec conception d'une gare de dépassement

Présenté par :

BIBECHE Abderraouf

Encadré par :

Mr. GOUMETTRE Ahmed

Promotion 2025 /2026

© ENSTP-FJ – Garidi – Vieux Kouba

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Mes remerciements vont tout d'abord à mon encadrant, Mr. Goumetre, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement précieux tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique et son expertise dans le domaine ferroviaire ont été des atouts indispensables pour mener à bien ce projet.

Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail et de consacrer une partie de leur précieux temps à sa lecture critique.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance envers la Société Nationale des Transports Ferroviaires (Société Nationale des Transports Ferroviaires) pour m'avoir accordé l'accès à leurs documentations techniques, aux dossiers de l'Avant-Projet Détaillé (APD), ainsi que pour leur accueil lors des visites sur le terrain.

Mes remerciements s'adressent tout particulièrement à l'équipe de **Cosider T154** ainsi qu'à l'équipe du bureau d'études **GCB** pour leur collaboration, leur accueil chaleureux et le partage d'expérience enrichissant dont ils m'ont fait bénéficier.

Je ne saurais oublier mes professeurs du Département "DIB" de l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics pour la formation de qualité qu'ils m'ont dispensée tout au long de mon cursus.

Enfin, je tiens à expressément exprimer ma gratitude infinie à ma famille, et particulièrement à mes parents, pour leur soutien indéfectible, leur patience et les sacrifices consentis qui m'ont permis d'atteindre ce niveau d'études. Un grand merci également à mes frères, **Yasser** et **Djamel**, pour leur aide précieuse, leurs encouragements constants et leur présence à mes côtés tout au long de ce parcours.

Dédicaces

Dédicaces

À mes parents,
pour leur amour inconditionnel, leur soutien sans faille
et les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation.

À mon frère ***Noufel****, mon beau-frère* ***Yasser*** *et ma sœur,*
pour leurs encouragements constants et leur présence bienveillante.

À ma petite nièce ***Nouna****,*
pour ses sourires et sa joie de vivre quotidiennement partagés.

À mes amis et camarades de promotion,
Fido, ***Srs***, ***Boulboule***, ***Lok***, ***Siraj***, ***Nassim***, ***Hi-Hi***, ***Le K***, ***Lboudj***,
Yanas, ***Oussama***, ***Dia***, ***Sidali***, et bien sûr sans oublier **Titouha**,
pour les moments de partage, de travail et de convivialité.

À tous ceux qui croient en l'avenir du ferroviaire algérien.

Résumé / Abstract / ملخص

Résumé — Ce mémoire présente l'étude technique en Avant-Projet Détaillé (APD) pour la modernisation du Tronçon A (Bouchegouf – Dréa, du PK 54+000 au PK 64+000) de la ligne ferroviaire Bouchegouf – Oued Kebrit (Section 2). Initié au PK 53+750 après le pont-rail sur l'Oued Seybouse, le tracé rectifié contourne la ville de Bouchegouf selon les exigences de la SNTF. La démarche intègre l'optimisation géométrique (tracé en plan et profil en long), le dimensionnement de la superstructure (rails UIC 60 E1 sur traverses en béton), et l'analyse géotechnique de stabilité des terrassements ($\geq$ 8 m) face à une géologie complexe (grès, argiles, alluvions). Enfin, l'étude dimensionne le drainage hydraulique, conçoit une gare de croisement, intègre le système de signalisation ERTMS et fournit l'estimation financière du projet.

Mots-clés : Modernisation ferroviaire, SNTF, APD, Tracé, Rail UIC 60, Terrassements ($\geq$ 8 m), Oued Seybouse, ERTMS.

Abstract — This thesis presents the Detailed Preliminary Design (APD) for the modernization of Section A (Bouchegouf – Dréa, from PK 54+000 to PK 64+000) of the Bouchegouf – Oued Kebrit railway line (Section 2). Beginning at PK 53+750 after the rail bridge over the Oued Seybouse, the realigned track bypasses Bouchegouf in compliance with SNTF standards. The methodology includes geometric optimization (horizontal and vertical alignment), superstructure design (UIC 60 E1 rails on concrete sleepers), and geotechnical slope stability analysis for critical earthworks ($\geq$ 8 m) within a complex geology (sandstone, clay, alluvium). Ultimately, the study dimensions the hydraulic drainage, designs a crossing station, integrates ERTMS signaling, and provides a detailed financial estimation.

Keywords : Railway modernization, SNTF, APD, Alignment, UIC 60 rail, Slope stability, Oued Seybouse, ERTMS.

ملخص — تتناول هذه المذكرة دراسة تقنية مفصلة (اص) لتحديث الشطر ٢ (بوشقوف – دريعة، من النقطة الكيلومترية ٤٥"٠٠٠ إلى ٤٦"٠٠٠) لخط السكة الحديدية بوشقوف – وادي الكبريت (المقطع ٢). ينطلق المسار المصحح من النقطة ٣٥"٠٥٧ بعد الجسر الحديدي على وادي سيبوس ليتفادى مدينة بوشقوف تماشياً مع متطلبات الشركة الوطنية للنقل بالسكك الحديدية (ضةس). تشمل الدراسة تحسين الهندسة الخطية (المسار الأفقي والملف الطولي)، وتصميم البنية الفوقية (قضبان وير ٠٦ زا على عوارض خرسانية)، ودراسة استقرار المنحدرات للحفريات والردميات الكبرى ($\geq$ ٨ م) في بيئة جيولوجية معقدة (حجر رملي، طين، وطمي). أخيرًا، تتضمن الدراسة تصميم شبكة التطهير وتصريف المياه، تهيئة محطة التجاوز، دمج نظام الإشارات الحديث (زضةشض)، بالإضافة إلى التقييم المالي للمشروع.

كلمات مفتاحية : تحديث السكك الحديدية، ضةس، مسار خطي، قضبان وير ٠٦، استقرار المنحدرات، وادي سيبوس، نظام زضةشض.

Table des matières

Remerciements **1**

Dédicaces **2**

Résumé **3**

Table des matières . . . . . **i**

Liste des figures . . . . . **vi**

Liste des tableaux . . . . . **vii**

Liste des abréviations . . . . . **ix**

Liste des annexes . . . . . **xi**

I GÉNÉRALITÉS **1**

GÉNÉRALITÉS **1**

1.1 Rôle Socio-Économique du Transport Ferroviaire 1

1.1.1 Rôle Économique 1

1.1.2 Rôle Social 2

1.2 Avantages du Transport Ferroviaire 2

1.2.1 Avantages Techniques 2

1.2.2 Avantages Économiques 2

1.2.3 Avantages Environnementaux 3

1.2.4 Avantages Sociaux 3

1.3 Présentation du Réseau Ferroviaire National 3

1.4 Problématique et Enjeux 3

1.5 Objectifs du Mémoire 5

II Présentation du Projet **6**

2.1 Présentation Générale de la Ligne Minière de l'Est 6

2.2 Analyse de la Section 2 (Bouchegouf – Oued Kebrit) 8

III Superstructure de la voie **9**

3.1 Introduction 9

3.2 L'armement de la voie 9

3.2.1 Les rails 9

3.2.2 Les traverses 10

3.2.3 Les attaches 11

3.2.4 Les appareils de voie . . . 11
3.3 Étude de la superstructure de la voie . . . 11
3.3.1 Le rail . . . 12
3.3.2 Les traverses . . . 14
3.3.3 L'attache . . . 16
3.3.4 Les appareils de voie . . . 17
3.3.5 Synthèse des choix techniques . . . 17
3.4 Conclusion . . . 17

IV Caractéristiques géométriques du tracé . . . 18
4.1 Principes de conception et valeurs limites . . . 18
4.2 Le tracé en plan . . . 19
4.2.1 Conditions à respecter du tracé en plan . . . 19
4.2.2 Les éléments constitutifs du tracé en plan . . . 19
4.2.3 Application au projet . . . 24
4.3 Le profil en long . . . 26
4.3.1 Définition . . . 26
4.3.2 Élément géométrique du profil en long . . . 26
4.3.3 Application à notre projet . . . 27
4.3.4 Conclusion . . . 27
4.4 Coordination entre le Profil en Long et le Tracé en Plan . . . 28
4.4.1 Exigences fondamentales de la coordination géométrique . . . 28
4.4.2 Les Étapes Chronologiques de Conception . . . 29

V Hydrologie et Hydraulique . . . 31
5.1 Introduction . . . 31
5.2 Localisation hydrologique et réseau hydrographique . . . 31
5.2.1 Localisation du projet . . . 31
5.2.2 Le réseau hydrographique de l'Oued Seybouse . . . 32
5.3 Caractéristiques climatiques et pluviométriques . . . 32
5.3.1 Régime des températures . . . 32
5.3.2 Analyse de la pluviométrie . . . 32
5.3.3 Pluies de courte durée et courbes IDF . . . 33
5.3.4 Contexte du projet . . . 35
5.3.5 Méthodologie de calcul . . . 35
5.4 Méthodologie d'évaluation des crues de projet . . . 36
5.4.1 Temps de concentration (T_c) . . . 36
5.4.2 La Formule Rationnelle . . . 36
5.4.3 La Formule de Crupedix . . . 37
5.5 Résultats et vérification du calage des ouvrages . . . 38
5.5.1 Récapitulatif des débits des bassins versants . . . 38
5.5.2 Vérification hydraulique des structures de drainage et d'art . . . 38
5.5.3 Analyse de cohérence et interprétation des résultats . . . 38

5.6 Conclusion . . . 39

VI Géologie et Géotechnique . . . 40

6.1 Géologie . . . 40

6.1.1 Situation géographique de la zone d'étude . . . 40

6.1.2 Cadre géologique de la zone d'étude . . . 41

6.1.3 Cadre lithologique général de la zone d'étude . . . 41

6.1.4 Sectorisation géologique . . . 42

6.1.5 Cadre sismique . . . 42

6.2 Programme d'investigation géotechnique . . . 43

6.2.1 Objectifs des reconnaissances . . . 43

6.2.2 Implantation des points de sondage . . . 44

6.3 Résultats obtenus et interprétations . . . 45

6.3.1 Essais in-situ . . . 45

6.3.2 Essais de laboratoire . . . 49

6.4 Classification synthétique et Conclusion . . . 52

6.4.1 Conclusion générale . . . 53

VII Terrassements et ouvrages d'art . . . 54

7.1 Travaux de terrassement . . . 54

7.1.1 Synthèse des zones de remblai (H $\geq$ 8 m) . . . 54

7.1.2 Synthèse des zones de déblai (H $\geq$ 8 m) . . . 54

7.1.3 Bilan de stabilité et zones nécessitant un renforcement . . . 56

7.1.4 Approvisionnement en matériaux et réutilisation des déblais . . . 56

7.2 Ouvrage d'art . . . 57

7.2.1 Définition et rôle des ouvrages d'art ferroviaires . . . 57

7.2.2 Classification des ouvrages d'art . . . 57

7.2.3 Composants principaux d'un ouvrage d'art . . . 58

7.2.4 Principes de conception . . . 58

7.2.5 Présentation des ouvrages d'art du projet . . . 59

7.2.6 Tableau récapitulatif des ouvrages d'art . . . 63

7.2.7 Bases du dimensionnement . . . 63

VIII Assise Ferroviaire . . . 65

Introduction . . . 65

8.1 Différentes couches d'assise . . . 65

8.1.1 Le ballast . . . 66

8.1.2 La sous-couche . . . 66

8.1.3 La plateforme . . . 67

8.2 Classification des sols pour la plateforme . . . 68

8.3 La classe de portance de la plateforme . . . 69

8.4 Calcul des épaisseurs minimales des couches d'assise . . . 70

8.5 Application au projet — Tronçon PK 54 à PK 64 . . . 70

8.6 Caractéristiques des matériaux . . . 71
8.6.1 Matériaux pour couche de forme ferroviaire . . . 71
8.6.2 Matériaux pour couche de fondation ferroviaire . . . 71
8.6.3 Matériaux pour sous-ballast . . . 71
8.6.4 Ballast . . . 72
8.7 Conclusion . . . 72

IX Profil en travers . . . 73
9.1 Les éléments du profil en travers . . . 73
9.1.1 Éléments de superstructure : . . . 73
9.1.2 Éléments de l'infrastructure : . . . 73
9.1.3 Éléments du talus : . . . 73
9.1.4 Éléments d'assainissement : . . . 74
9.2 Profil en travers type de mon projet . . . 74
9.3 Cubatures et quantification . . . 79
9.3.1 Quantification des matériaux de la superstructure et de l'infrastructure . . . 79
9.3.2 Calcul des cubatures de terrassement . . . 79

X Conception de la gare de croisement . . . 81
10.1 Introduction . . . 81
10.2 Localisation et caractéristiques générales . . . 81
10.3 Configuration transversale des voies . . . 81
10.4 Appareils de voie (ADV) . . . 82
10.5 Garage franc . . . 83
10.6 Longueur utile des voies . . . 84
10.7 Conclusion . . . 85

XI Signalisation, Télécommunication et Sécurité (ERTMS) . . . 87
11.1 Introduction et Role de la Signalisation . . . 87
11.1.1 Definition de la Signalisation Ferroviaire . . . 87
11.1.2 Role de la Signalisation . . . 87
11.1.3 Principes d'Implantation en Algerie . . . 88
11.2 Les Systemes de Cantonnement (Blocks) . . . 88
11.2.1 Definition du Cantonnement . . . 88
11.2.2 Types de Cantonnement . . . 88
11.2.3 Application au Projet . . . 90
11.3 Introduction au Systeme ERTMS . . . 90
11.3.1 Contexte et Objectifs . . . 90
11.3.2 Niveaux de l'ETCS . . . 91
11.3.3 Comparaison des Niveaux ETCS . . . 92
11.3.4 Application de l'ERTMS au Projet . . . 93
11.4 Application de la Signalisation sur le Trace du Projet . . . 93
11.4.1 Implantation des Signaux . . . 93

11.4.2 Poste de Commande Informatise (PCI) 94
11.5 Conclusion 94

XII Impact environnemental et mesures d'atténuation 95
12.1 Cadre réglementaire 95
12.2 Description de l'état initial de la zone du projet 95
12.2.1 Environnement physique : 97
12.2.2 Environnement humain et socio-économique : 97
12.2.3 Environnement biologique : 98
12.3 Évaluation de l'impact du projet 98
12.3.1 Les impacts positifs 98
12.3.2 Les impacts négatifs et les mesures d'atténuation envisagées 98
12.4 Conclusion 101

XIII DEVIS ESTIMATIF QUANTITATIF 103
13.1 Introduction 103
13.2 Tableau du devis estimatif et quantitatif 103
13.3 Arrêté du présent devis 105

XIV Conclusion Générale et Perspectives 106

A Listing géométrie 107

B Tracé combiné 110

C Cubature 117

Liste des figures

2.1 Schéma de la Ligne Minière de l'Est et de ses principales connexions 7

3.1 Assemblage par soudage 10
3.2 Shema representatif d'un appareil de voie 12
3.3 Les constituants de la section transversale du rail 13
3.4 Profil du rail type UIC60 E1 14
3.5 Traverse B440 (VAX U31) 15
3.6 Traverse en bois pour appareil de voie 16
3.7 Attache de type NABLA 16

5.1 Extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000 (Secteur Bouchegouf – Souk Ahras). 33
5.2 Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) de la station de Guelma. 34
5.3 Carte des classes de pentes de la zone d'étude. 37

6.1 Localisation de la wilaya de Guelma 40
6.2 Situation du tronçon sur la carte géologique de Bouchegouf 41
6.3 Coupe des sondages carottés 46

7.1 Profil en long – OA 1 : Pont BP sur la RN 16 60
7.2 Profil en long – OA 2 : Pont BP sur route locale 60
7.3 Profil en long – OA 3 : Viaduc mixte acier–béton 61
7.4 Profil en long – OA 4 : Viaduc mixte acier–béton 62
7.5 Profil en long – OA 5 : Viaduc mixte acier–béton 62

9.1 Profil en travers type :Section (PONT POUTRE) 76
9.2 Profil en travers type : Section (PONT MIXTE) 77
9.3 Profil en travers type : Section OUVRAGE HYDRAULIQUE 78

10.1 Tracé en plan de la gare de croisement – vue générale 82
10.2 Détail des appareils de voie type UIC60-500-1/12 83

Liste des tableaux

3.1 Caractéristiques du rail UIC 60 E1 . . . 13
3.2 Caractéristiques des traverses en bois pour appareils de voie . . . 15
3.3 Synthèse des éléments de la superstructure . . . 17

4.1 Valeurs limites du dévers . . . 20
4.2 Les valeurs limites de l'insuffisance du dévers . . . 21
4.3 Les valeurs limites de l'excès du dévers . . . 21
4.4 Les valeurs de la courbure . . . 22
4.5 Limitation de la courbure . . . 22
4.6 Limite de la variation des dévers . . . 23
4.7 Limite de la variation de l'insuffisance de dévers . . . 24
4.8 Vérification des coefficients de dévers . . . 25
4.9 Paramètres de conception des courbes ferroviaires . . . 25
4.10 Caractéristiques des courbes . . . 25
4.11 Les déclivités par rapport aux longueurs . . . 26
4.12 Les longueurs minimales des éléments de profil en long . . . 27
4.13 Les valeurs de rayon minimal selon la SNTF . . . 27
4.14 Les valeurs des paramètres de profil en long . . . 27

5.1 Caractéristiques macro-hydrologiques du bassin de l'Oued Seybouse Maritime . . . 31
5.2 Principaux affluents formant l'Oued Seybouse (Wilaya de Guelma) . . . 32
5.3 Moyennes mensuelles et annuelles des températures (°C) de la station de Guelma . . . 32
5.4 Paramètres de Montana (a et b) pour la station de Guelma . . . 34
5.5 Valeurs des débits centennaux (Q_{100}) calculés pour le Tronçon centre, Section 01 : Bouchegouf – Souk Ahras. . . . 38
5.6 Dimensions des ouvrages de drainage (Tronçon centre, Section 01) . . . 39

6.1 Programme d'investigation géotechnique par lot . . . 43
6.2 Objectifs des investigations géotechniques . . . 43
6.4 Sondages réalisés sur le tronçon étudié . . . 44
6.5 Synthèse des résultats des sondages pénétrométriques (PDL1 à PDL4) . . . 47
6.6 Caractéristiques pressiométriques par sondage . . . 48
6.8 Coupe géologique des forages pressiométriques . . . 49
6.10 Propriétés d'état . . . 49
6.12 Limites d'Atterberg (Norme NF P 94-051) . . . 50

6.14 Résultats de l'analyse granulométrique (Norme NF P 94-057) 50
6.16 Caractéristiques de cisaillement (Boîte de Casagrande NF P 94-071-2 et Triaxial NF P 94-074) 51
6.18 Essais de compression simple sur roche (Norme NF P 94-077) 51
6.20 Essais œdométriques (Norme NF P 94-090-1) 51
6.22 Analyses chimiques (Normes NF P 94-048 & 94-055) 52
6.24 Tableau de synthèse finale : Classification GTR et UIC du tracé 53

7.1 Zones de remblai de hauteur $\geq$ 8 m – PK 54+000 – PK 64+000 54
7.2 Zones de déblai de hauteur $\geq$ 8 m – PK 54+000 – PK 64+000 55
7.3 Portées caractéristiques selon le type d'ouvrage d'art 59
7.4 Tableau récapitulatif des ouvrages d'art – caractéristiques géométriques des appuis . . . 63

8.1 Classification des sols rencontrés sur le tronçon PK 54 – PK 64 68
8.2 Classe de portance de la plateforme – Fiche UIC 719R 69
8.3 Récapitulatif des épaisseurs des couches d'assise (QS1 $\rightarrow$ P2, UIC 719R) 72

9.1 Caractéristiques des talus selon la nature et la hauteur 75
9.3 Cubatures et caractéristiques géométriques des couches d'assise (Voie double – 10 km) . 79
9.4 Résultats du calcul des volumes de terrassement globaux (PK 54+000 – PK 64+000) . . 80
9.5 Synthèse quantitative générale du projet 80

10.1 Caractéristiques générales de la gare 81
10.2 Entre-axes des voies dans la gare 82
10.3 Proposition d'implantation des appareils de voie (ADV) 83
10.4 Tableau d'implantation des points de garage franc (GF) par appareil de voie 84
10.5 Calcul des longueurs utiles des voies de la zone d'étude 85

11.1 Signification des signaux du BAL 89
11.2 Comparaison des niveaux ETCS 92

12.1 Cadre réglementaire et législatif applicable au projet 96
12.3 Synthèse des impacts environnementaux et solutions d'atténuation 99

Liste des abréviations

UIC	Union Internationale des Chemins de fer
SNTF	Société Nationale des Transports Ferroviaires
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français
SNCB	Société Nationale des Chemins de fer Belges
RFF	Réseau Ferré de France (historique)
ERA	European Railway Agency (Agence Ferroviaire Européenne)
FIF	Fédération des Industries Ferroviaires
APD	Avant-Projet Détaillé
APS	Avant-Projet Sommaire
MNT	Modèle Numérique de Terrain
GTR	Guide des Terrassements Routiers
SPT	Standard Penetration Test
DAO	Dossier de Consultation des Entreprises / Dessin Assisté par Ordinateur
MOA	Maîtrise d'Ouvrage
MOE	Maîtrise d'Œuvre
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ETCS	European Train Control System
GSM-R	Global System for Mobile communications - Railway
EVC	European Vital Computer (Ordinateur de bord de sécurité)
DMI	Driver Machine Interface (Console de conduite)
RBC	Radio Block Centre (Centre de Bloc Radio)
LEU	Lineside Electronic Unit (Unité Électronique en Voie)
EUROBALISE	Balise standardisée européenne au sol
KVB	Contrôle de Vitesse par Balises
TVM	Transmission Voie-Machine
DAAT	Dispositif d'Arrêt Automatique des Trains
AWS	Automatic Warning System
PK	Point Kilométrique
TPC	Traverses en béton Précontraint
LRS	Long Rail Soudé

LTV	Limitation Temporaire de Vitesse
NEx	Nœud Ferroviaire
VUT	Voie Unique Temporaire
IPCS	Installations Permanent de Contre-Sens
ADV	Appareil de Voie (Aiguillage)
IF	Installation Ferroviaire
PL	Pleine Ligne
ZAR	Zone d'Arrêt Réduite
LGV	Ligne à Grande Vitesse
TAGV	Train à Grande Vitesse
TER	Transport Express Régional
RER	Réseau Express Régional
TCO	Tableau de Contrôle Optique
AIG	Aiguille / Aiguillage
GCO	Grande Ceinture ferroviaire
PN	Passage à Niveau
EAS	Équipement Agent Seul (Conduite sans contrôleur)
VACMA	Veille Automatique à Contrôle de Maintien d'Appui (Dispositif homme-mort)
LAC	Ligne Aérienne de Contact (Caténaire)
SS	Sous-Station électrique
CSR	Commande Centralisée du Réseau

Liste des annexes

1 Listing géométrie 107
2 Tracé combiné 110
3 Cubature 117

Chapitre I

GÉNÉRALITÉS

Introduction

Le transport ferroviaire constitue l'un des piliers majeurs du développement socio-économique moderne. Face aux impératifs actuels de transition écologique, de fluidification des échanges commerciaux et de réduction des coûts de transport de marchandises (fret) et de voyageurs, la voie ferrée s'impose comme une solution d'infrastructure hautement performante.

1.1 Rôle Socio-Économique du Transport Ferroviaire

1.1.1 Rôle Économique

Le transport ferroviaire joue un rôle économique majeur dans le développement de l'Algérie. Ses contributions principales sont les suivantes :

Transport de Marchandises

Le ferroviaire constitue le mode de transport le plus adapté pour le fret lourd et volumineux. En Algérie, il assure principalement :

— Le transport des hydrocarbures et de leurs dérivés

— Le transport des produits miniers (phosphates, fer, zinc)

— Le transport des produits agricoles et agroalimentaires

— Le transport des marchandises conteneurisées

Le coût de transport par tonne-kilomètre par rail est significativement inférieur à celui du transport routier, ce qui représente un avantage économique considérable pour les entreprises et l'économie nationale.

Développement Régional

Le réseau ferroviaire contribue au désenclavement des régions intérieures et au développement économique équilibré du territoire. Les lignes ferroviaires facilitent :

— L'accès aux marchés pour les produits locaux

— L'implantation d'activités économiques le long des corridors ferroviaires

— La création d'emplois directs et indirects dans le secteur ferroviaire et ses activités connexes

— La structuration de l'espace territorial autour des pôles de développement

1.1.2 Rôle Social

Sur le plan social, le transport ferroviaire assure une mission de service public essentielle :

— **Mobilité des populations :** Le ferroviaire offre un mode de transport sûr, confortable et abordable pour les déplacements interurbains.

— **Accessibilité :** Il permet aux populations des zones rurales et péri-urbaines d'accéder aux services publics, à l'emploi et aux équipements des grandes villes.

— **Sécurité routière :** En offrant une alternative au transport routier, le ferroviaire contribue à la réduction de l'accidentalité sur les routes.

— **Cohésion sociale :** Il renforce les liens entre les différentes régions du pays et favorise les échanges culturels et sociaux.

1.2 Avantages du Transport Ferroviaire

Le transport ferroviaire présente de nombreux avantages comparatifs par rapport aux autres modes de transport terrestre. Ces avantages justifient pleinement les investissements consacrés au développement du réseau ferré.

1.2.1 Avantages Techniques

0. **Capacité de transport élevée :** Une ligne ferroviaire à double voie peut transporter jusqu'à 5 000 passagers par heure et par direction.
0. **Régularité et fiabilité :** Le rail est moins sensible aux conditions météorologiques et aux congestions que le transport routier.
0. **Sécurité :** Le ferroviaire est statistiquement le mode de transport terrestre le plus sûr, avec un taux d'accidentalité très faible.

1.2.2 Avantages Économiques

0. **Coût de transport compétitif :** Pour les longues distances et les volumes importants, le coût par tonne-kilomètre ou par passager-kilomètre est inférieur à celui du routier.
0. **Coût d'infrastructure amorti :** Bien que l'investissement initial soit élevé, la durée de vie des infrastructures ferroviaires (50–100 ans) permet un amortissement sur le long terme.
0. **Externalités positives :** Le ferroviaire génère moins de coûts externes (accidents, pollution, congestion) que le transport routier.

1.2.3 Avantages Environnementaux

0. **Faible empreinte carbone :** L'électrification du rail permet une décarbonation significative du transport, particulièrement lorsque l'électricité provient de sources renouvelables.
0. **Réduction de la pollution atmosphérique :** Les trains électriques ne produisent pas de pollution locale (NO_x, particules fines) au point d'utilisation.
0. **Préservation des paysages :** Les lignes ferroviaires peuvent être intégrées au paysage de manière plus harmonieuse que les grandes infrastructures routières.

1.2.4 Avantages Sociaux

0. **Accessibilité pour tous :** Le ferroviaire offre un service universel accessible aux personnes à mobilité réduite.
0. **Qualité de vie :** Les trains offrent un confort de voyage supérieur, avec la possibilité de travailler ou de se reposer pendant le trajet.
0. **Réduction de la congestion urbaine :** Les transports en commun ferroviaires désengorgent les villes et améliorent la qualité de l'air.

1.3 Présentation du Réseau Ferroviaire National

L'histoire du réseau ferroviaire algérien remonte au milieu du XIX^{e} siècle, marqué par la construction de la toute première ligne reliant Alger à Blida, inaugurée en 1862. Initialement développé pour répondre aux besoins d'échanges commerciaux et stratégiques de l'époque, le réseau s'est progressivement étendu pour structurer le pays d'est en ouest et vers les régions des hauts plateaux. Après l'indépendance, l'État a nationalisé les infrastructures, ce qui a conduit à la création de la SNTF en 1976 pour unifier et gérer l'ensemble du trafic.

Après une période de stagnation en fin de siècle, ce réseau connaît aujourd'hui une transformation majeure. Guidé par la volonté de l'État de désenclaver les régions et de moderniser les transports, il s'est considérablement développé. Cette dynamique moderne de relance et d'extension est portée par l'impulsion conjointe de l'**ANESRIF** (l'Agence nationale d'études et de suivi de la réalisation des investissements ferroviaires), qui pilote les nouveaux investissements, et de la **SNTF** (Société nationale des transports ferroviaires), qui assure l'exploitation.

L'étude du contexte ferroviaire algérien est essentielle pour comprendre les enjeux du présent projet et pour s'inscrire dans la continuité des efforts de développement du réseau ferré national. Elle permet également d'identifier les normes, les pratiques et les contraintes spécifiques au contexte algérien qui guideront la conception de notre ligne ferroviaire.

1.4 Problématique et Enjeux

La conception d'une ligne ferroviaire constitue un défi technique majeur qui requiert une approche multidisciplinaire intégrant la géométrie de la voie, la géotechnique, l'hydrologie, la signalisation et

l'environnement.

Les enjeux associés à cette problématique sont multiples :

— **Enjeu technique :** Concevoir une infrastructure durable et performante, capable de supporter les charges ferroviaires et les contraintes climatiques locales sur le long terme.

— **Enjeu économique :** Optimiser les coûts de construction et d'exploitation tout en garantissant la qualité et la sécurité du service.

— **Enjeu environnemental :** Minimiser l'impact du projet sur les écosystèmes locaux et intégrer les principes du développement durable.

— **Enjeu social :** Contribuer au développement régional et à l'amélioration de l'accessibilité des populations.

1.5 Objectifs du Mémoire

Ce mémoire vise à atteindre les objectifs suivants :

0. **Objectif général :** Concevoir de manière complète et détaillée une ligne ferroviaire en Algérie en réalisant une étude d'avant-projet détaillée, depuis l'infrastructure proposée jusqu'au devis estimatif.

0. **Objectifs spécifiques :**
   - Analyser le contexte ferroviaire algérien et identifier les normes applicables.
   - Concevoir la superstructure de la voie (rail, traverses, appareils de voie).
   - Définir la géométrie de la voie (tracé en plan et profil en long).
   - Étudier la zone d'étude et caractériser son contexte géologique et géotechnique.
   - Dimensionner l'assise ferroviaire à partir des résultats géotechniques.
   - Réaliser l'étude hydrologique et concevoir les ouvrages d'assainissement.
   - Quantifier les terrassements et identifier les ouvrages d'art nécessaires.
   - Concevoir une gare de dépassement avec ses installations.
   - Étudier la signalisation ferroviaire et les systèmes de sécurité.
   - Évaluer l'impact environnemental du projet.
   - Établir le devis estimatif global du projet.

Chapitre II

Présentation du Projet

Introduction

L'histoire du réseau ferroviaire algérien remonte au milieu du XIX^{e} siècle, marquée par la construction de la toute première ligne reliant Alger à Blida, inaugurée en 1862. Initialement développé pour répondre aux besoins d'échanges commerciaux et stratégiques de l'époque, le réseau s'est progressivement étendu pour structurer le pays d'est en ouest et vers les régions des hauts plateaux. Après l'indépendance, l'État a nationalisé les infrastructures, ce qui a conduit à la création de la SNTF en 1976 pour unifier et gérer l'ensemble du trafic.

Après une période de stagnation en fin de siècle, ce réseau connaît aujourd'hui une transformation majeure. Guidé par la volonté de l'État de désenclaver les régions et de moderniser les transports, il s'est considérablement développé. Cette dynamique moderne de relance et d'extension est portée par l'impulsion conjointe de l'**ANESRIF** (l'Agence nationale d'études et de suivi de la réalisation des investissements ferroviaires), qui pilote les nouveaux investissements, et de la **SNTF** (Société nationale des transports ferroviaires), qui assure l'exploitation.

2.1 Présentation Générale de la Ligne Minière de l'Est

Au sein de cette stratégie nationale, la **Ligne Minière de l'Est** s'impose comme l'un des méga-projets ferroviaires les plus importants du pays. Son histoire commence dès 1874 avec le lancement des travaux du tronçon Annaba–Guelma par la Compagnie des Chemins de Fer de Bône-Guelma. Très vite, l'extension de la ligne vers Souk Ahras et Tébessa est devenue indispensable pour acheminer le minerai de fer de l'Ouenza et les phosphates du Kouif vers le littoral. En raison de l'importance stratégique de ce trafic lourd et des difficultés du relief, cette ligne a été l'une des toutes premières à être électrifiée sur le continent africain dès les années 1930. Dans les années 1960, son prolongement vers le gisement de Djebel Onk a définitivement ancré sa vocation industrielle.

Aujourd'hui, après plus d'un siècle de service ayant entraîné un vieillissement important des voies, la ligne subit une modernisation complète. Principal axe économique du nord-est, elle est repensée pour assurer le transport de passagers et de marchandises diverses, mais surtout le transport massif de matières premières. Ce corridor de plus de 400 km relie directement :

— **Les zones d'extraction :** Les gisements de phosphate de Bled El Hadba et de Djebel Onk (Wilaya de Tébessa).

— **Les zones de transformation :** Les usines de fertilisants, notamment le grand complexe d'Oued Keberit (Wilaya de Souk Ahras).

— **Les zones d'exportation :** Les infrastructures portuaires de Annaba.

Pour mener à bien sa modernisation et la rectification de son tracé, le projet global a été divisé en trois grandes sections :

— **Section 1 :** Annaba – Bouchegouf

— **Section 2 :** Bouchegouf – Oued Kebrit

— **Section 3 :** Oued Kebrit – Djebel Onk

Pour supporter les contraintes de ce trafic lourd, le projet impose des standards techniques rigoureux : un dédoublement et une électrification complète des voies, le déploiement du système de sécurité et de signalisation de pointe **ERTMS (niveaux 1 ou 2)**, et une structure de voie calculée pour une charge de 22,5 tonnes à l'essieu. À terme, les vitesses d'exploitation cibles atteindront 160 km/h pour les trains de voyageurs et 120 km/h pour les trains de marchandises (fret).

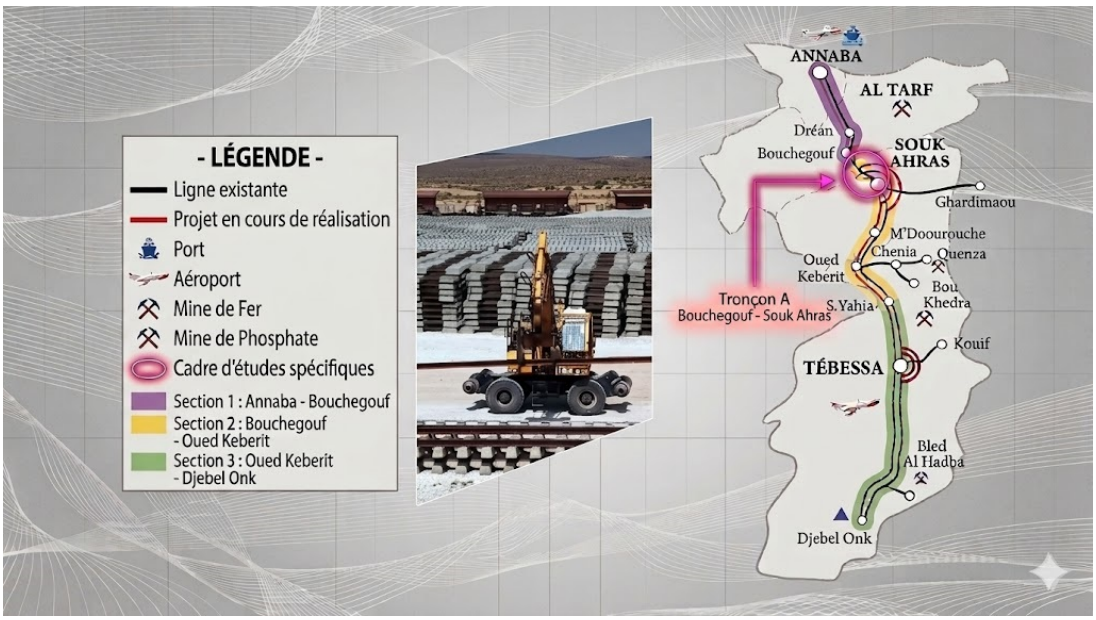


FIGURE 2.1 – Schéma de la Ligne Minière de l'Est et de ses principales connexions

2.2 Analyse de la Section 2 (Bouchegouf – Oued Kebrit)

La Section 2, reliant Bouchegouf à Oued Kebrit, constitue la partie la plus complexe de ce projet ferroviaire. Le tracé y présente un profil géométrique difficile, marqué par une transition topographique brusque. Le défi principal de l'ingénierie réside dans la gestion de ce saut d'altitude, où la ligne doit s'élever progressivement depuis le niveau de la mer jusqu'à plus de 700 mètres d'altitude sur les hauts plateaux de l'intérieur.

Sur l'infrastructure existante à voie unique, les contraintes géométriques limitaient fortement les performances, avec des vitesses maximales de 100 km/h pour les trains de voyageurs et de 80 km/h pour le fret. Pour moderniser cet axe et l'adapter aux exigences actuelles, d'importants travaux de génie civil lourd s'avèrent nécessaires. Cela implique notamment des terrassements majeurs pour stabiliser les plateformes de voie, ainsi que la construction de nombreux ouvrages d'art (tunnels et viaducs) indispensables pour limiter le pourcentage des pentes (rampes) et prévenir le patinage des convois de fret lourds.

C'est précisément au sein de cette zone stratégique que s'inscrit ce mémoire de fin d'études. Ce travail porte sur l'étude en **Avant-Projet Détaillé (APD)** de nouveaux tronçons de rectification géométrique situés du **PK 54+000 au PK 64+000**, ce qui représente un linéaire de **10 kilomètres** implanté dans la wilaya de Guelma (daïra de Bouchegouf).

Ces opérations font partie intégrante du projet global de modernisation de la Section 2, et se concentrent plus particulièrement sur le **Tronçon A (Bouchegouf – Dréa)**. L'objectif principal de notre étude est de proposer et de valider les choix géométriques du nouveau tracé rectifié. De plus, ce travail intègre la conception d'une **gare de croisement** afin d'optimiser la capacité de la ligne et de fluidifier l'exploitation entre les trains de voyageurs et les trains miniers.

Chapitre III

Superstructure de la voie

3.1 Introduction

La superstructure ferroviaire constitue un élément fondamental pour la sécurité et la régularité de la circulation des trains. Elle regroupe l'ensemble des composants situés au-dessus de la plateforme, incluant notamment les rails, les traverses, les systèmes de fixation, le ballast, les appareils de voie ainsi que les dispositifs de signalisation.

3.2 L'armement de la voie

L'armement de la voie se compose des rails, des traverses, des attaches et du ballast. Cet ensemble constitue une part essentielle de l'infrastructure ferroviaire garantissant la sécurité, la stabilité et la fiabilité du transport ferroviaire.

3.2.1 Les rails

Les rails sont des profilés en acier disposés parallèlement sur les traverses. Ils forment la voie ferrée et respectent un écartement standard de **1435 mm** entre les deux files, couramment désigné sous le terme d'« **écartement normal** ». La longueur minimale des barres élémentaires varie de 18 à 36 mètres. Ces barres peuvent être soudées électriquement en atelier pour former des longueurs continues d'au moins 288 mètres, puis assemblées sur site par soudage aluminothermique.

Constitution du rail

La section transversale d'un rail Vignole se décompose comme suit :

— **Le patin** : partie inférieure en contact avec la traverse.

— **Le champignon** : partie supérieure formant la table de roulement.

— **L'âme** : élément vertical reliant le champignon au patin.

— **La table de roulement** : surface supérieure du champignon, directement en contact avec les roues.

Rôles du rail

Le rail a plusieurs fonctions essentielles :

— Il supporte et transmet les charges verticales et horizontales (efforts dus au poids du train, forces centrifuges), et les absorbe.

— Il guide le roulement des trains en assurant le maintien latéral des essieux.

— Il participe à la transmission du courant électrique nécessaire à la signalisation ferroviaire et à la traction des trains sur les lignes électrifiées.

Assemblage des rails

Les rails sont produits en longueurs unitaires comprises entre 18 et 36 mètres. Afin d'assurer la continuité et la résistance mécanique de la voie, les extrémités sont reliées par :

Soudage : il existe deux types de soudures :

— Soudure électrique : réalisée en atelier ou sur chantier pour obtenir de longues barres soudées.

— Soudure aluminothermique : effectuée directement sur la voie par réaction chimique exothermique à partir d'une charge de métal d'apport.

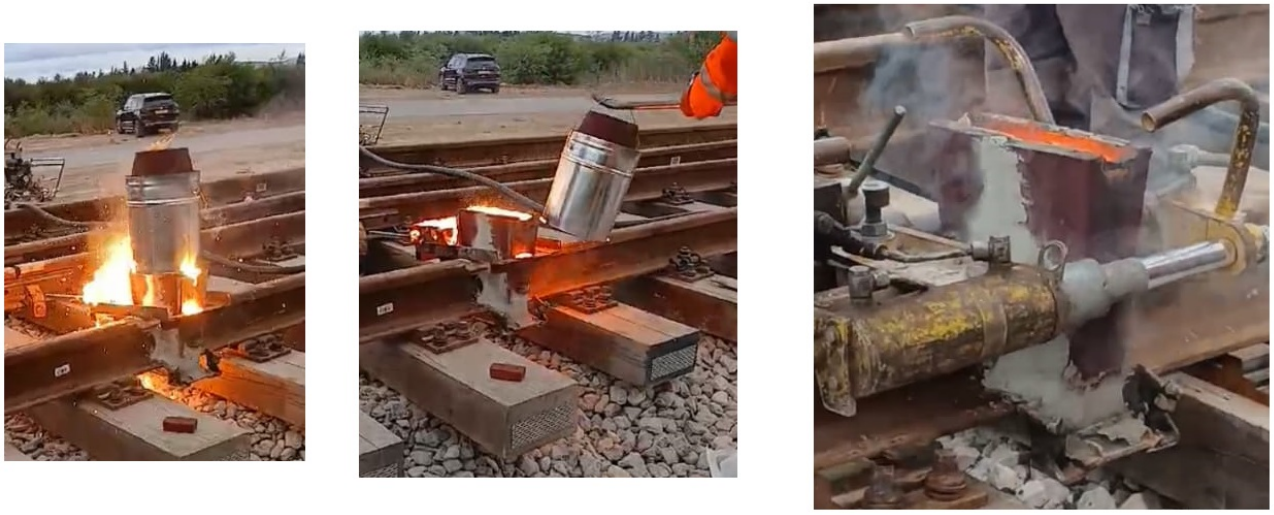


FIGURE 3.1 – Assemblage par soudage

3.2.2 Les traverses

Les traverses sont disposées perpendiculairement aux rails et constituent le support principal de ceux-ci. En Algérie, les types de traverses les plus couramment utilisés sont :

— **Traverses en bois** :
générallement utilisées au niveau des appareils de voie.

— **Traverses en béton** :

  — *Bibloc* : deux blocs de béton reliés par une entretoise métallique maintenant l'écartement des rails.

— *Monobloc* : poutre en béton précontraint offrant une meilleure résistance à la flexion et une répartition plus homogène des charges verticales, limitant ainsi les risques de poinçonnement.

Rôles des traverses

— Transmission des efforts entre le rail et le ballast.

— Maintien de l'écartement et de l'inclinaison des rails.

— Contribution à la stabilité géométrique de la voie.

— Répartition uniforme des charges appliquées par le trafic ferroviaire sur le ballast, garantissant ainsi la sécurité et la durabilité de l'infrastructure.

3.2.3 Les attaches

Les attaches sont des dispositifs mécaniques, élastiques ou rigides, fixés sur la traverse. Elles enserrent le patin du rail via des organes de serrage (tire-fond, boulons, cornets élastiques) et comportent des éléments intermédiaires. Une semelle en élastomère cannelée de 9 mm d'épaisseur est interposée entre le rail et la traverse pour amortir les vibrations.

Rôles des attaches

— Assurer le serrage du rail sur la traverse avec un effort contrôlé.

— Offrir une amplitude de serrage suffisante pour compenser d'éventuels relâchements.

— Maintenir des caractéristiques élastiques stables après plusieurs montages/démontages.

— Résister aux efforts longitudinaux et dynamiques induits par le passage des trains.

3.2.4 Les appareils de voie

Les appareils de voie sont des dispositifs permettant au matériel roulant de changer de voie ou de traverser une voie. Ils ne peuvent être implantés en dévers et ne permettent pas de courbe de raccordement dans la voie déviée. Le rayon minimal des aiguillages doit donc être déterminé en fonction de la vitesse autorisée, afin de garantir la sécurité.

On distingue trois catégories principales :

0. Le branchement simple ;
0. Le croisement ou traversée simple ;
0. La traversée-jonction (simple ou double), combinant les deux précédents.

3.3 Étude de la superstructure de la voie

La superstructure ferroviaire constitue l'ensemble des éléments posés sur la plateforme (ballast, traverses, rails, attaches) qui supportent directement le trafic ferroviaire. Le choix de ces composants

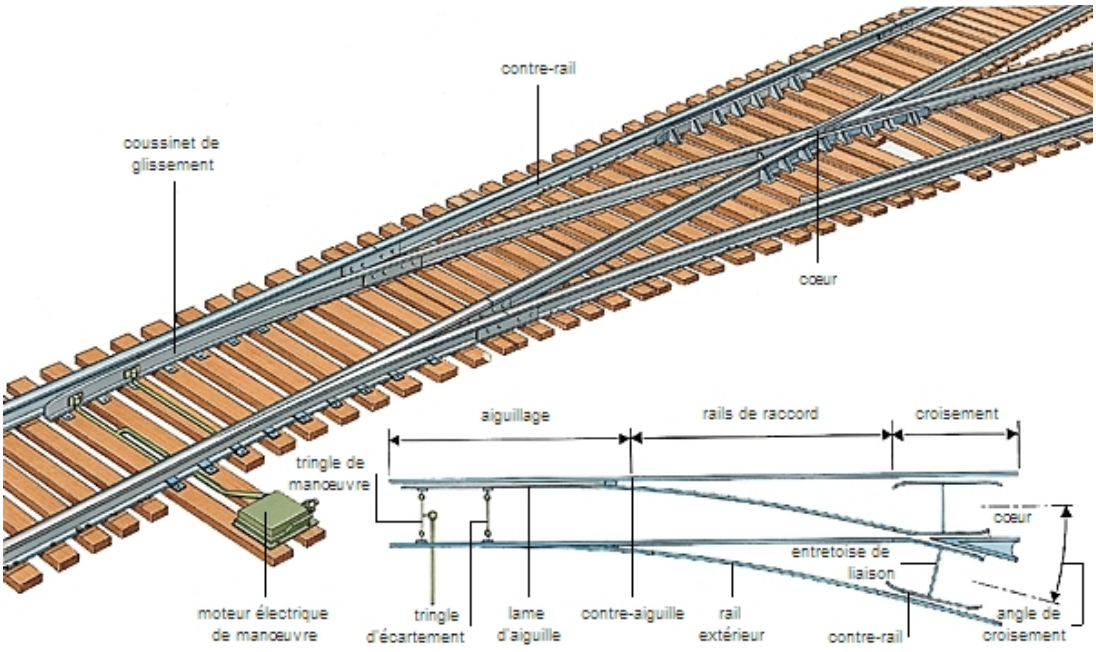


FIGURE 3.2 – Shema representatif d'un appareil de voie

conditionne la sécurité, la durabilité et la rentabilité de l'infrastructure. Dans le cadre de notre projet sur la **Ligne Minière de l'Est (Section 2 : Bouchegouf – Oued Kebrit)**, les éléments suivants ont été retenus pour répondre aux exigences du trafic mixte voyageurs/fret.

3.3.1 Le rail

Choix du profil

Pour répondre aux exigences de notre projet sur la Ligne Minière de l'Est (Section 2 : Bouchegouf – Oued Kebrit), le rail retenu est de type **Vignole UIC 60 E1**. Ce profil est adapté à une charge à l'essieu de **22,5 t** et à des vitesses cibles de **80 km/h (fret)** et **100 km/h (voyageurs)**, garantissant la robustesse nécessaire sur ce corridor minier.

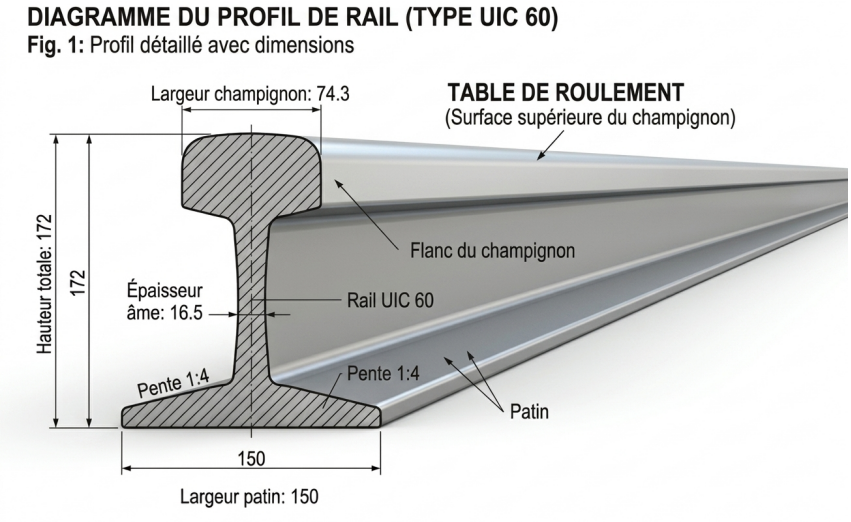


FIGURE 3.3 – Les constituants de la section transversale du rail

Caractéristiques techniques

TABLE 3.1 – Caractéristiques du rail UIC 60 E1

Caractéristique	Valeur
Masse	60,21 kg/ml
Surface de la section	76,7 cm^2
Hauteur du rail	172 mm
Largeur du champignon	72 mm
Largeur du patin	150 mm
Moment d'inertie (axe x-x)	3038,3 cm^4
Moment d'inertie (axe y-y)	512,3 cm^4
Résistance à la traction	$R \geq 880$ N/mm^2
Allongement	$R \geq 10\%$
Dureté au milieu de la table de roulement	260–300 HBW
Épaisseur de l'âme	16,5 mm
Dimension indicative B	52,053 mm
Dressage	Classe A
Nuance	260 (carbone-manganèse)

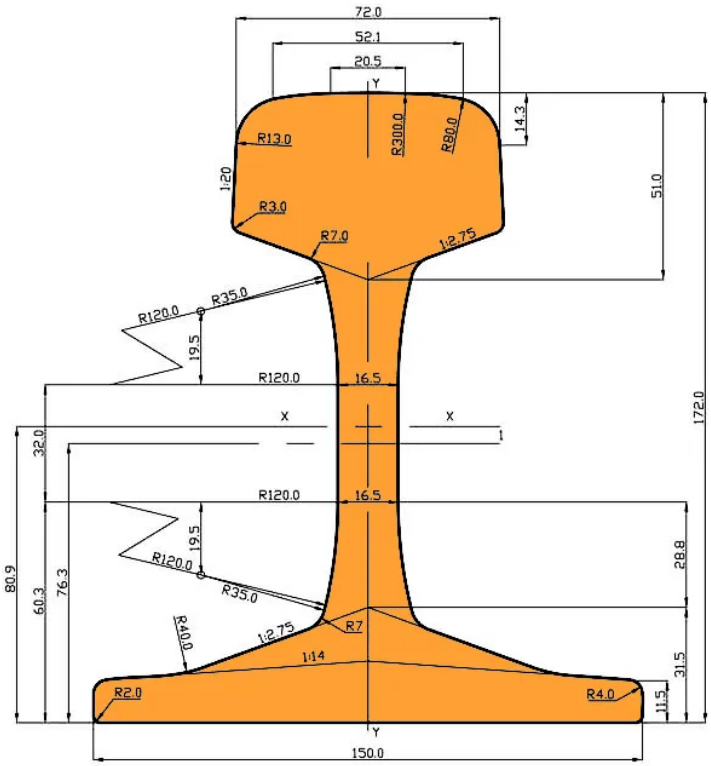


FIGURE 3.4 – Profil du rail type UIC60 E1

3.3.2 Les traverses

Stratégie de choix

Pour notre projet sur la Ligne Minière de l'Est (Section 2), deux types de traverses sont retenus :

— **Traverses en bois** : utilisées exclusivement au niveau des appareils de voie (aiguillages, croisements) pour leur flexibilité et leur facilité d'adaptation.

— **Traverses bibloc** : employées sur la voie courante pour offrir une bonne résistance aux efforts dynamiques et une excellente stabilité géométrique. Le modèle retenu est la traverse **B440 (Vax U31)**.

Nomenclature de la traverse B440 (Vax U31) selon la norme SNCF

— **B** : type de traverse = traverse Bo-bloc (bibloc)

— **4** : épaisseur de la traverse = 220 mm

— **4** : longueur de la traverse = 2244 mm

— **0** : modèle de base (pour rails U50 et UIC60)



FIGURE 3.5 – Traverse B440 (VAX U31)

Description de la traverse en bois

Les traverses en bois sont utilisées exclusivement au niveau des appareils de voie (aiguillages et croisements) pour leur flexibilité et leur facilité d'adaptation aux géométries complexes de ces zones. Leur mise en œuvre permet une installation et un ajustement aisés des différents éléments constituant les appareils de voie.

TABLE 3.2 – Caractéristiques des traverses en bois pour appareils de voie

Caractéristique	Valeur
Essence de bois	Chêne ou Hêtre
Longueur	2600 mm
Largeur	220 mm
Épaisseur	130 mm
Masse	Environ 55 kg
Traitement	Créosote ou sels de CCA
Durée de vie estimée	25 à 30 ans

Avantages des traverses en bois pour les appareils de voie :

— **Facilité de façonnage** : permet un usinage précis pour l'adaptation aux éléments d'aiguillage.

— **Souplesse mécanique** : absorption des chocs et vibrations, réduction du bruit.

— **Mise en œuvre rapide** : possibilité d'ajustement sur site sans équipement lourd.

— **Compatibilité** : adaptée aux configurations géométriques complexes des appareils de voie.

Inconvénients et précautions :

— **Entretien régulier** : nécessite un contrôle périodique de l'état du bois et du traitement.

— **Sensibilité environnementale** : risque de pourriture en cas de mauvais drainage.

— **Résistance au cisaillement** : inférieure à celle des traverses bibloc, d'où son utilisation limitée aux zones à faible effort tranchant.



FIGURE 3.6 – Traverse en bois pour appareil de voie

3.3.3 L'attache

Pour notre projet de modernisation de la Section 2 (Bouchegouf – Oued Kebrit), l'attache retenue est de type **NABLA (tire-fond spécial 22-115, type 5)**. Ce système élastique assure un maintien efficace sous les efforts dynamiques générés par les convois miniers lourds circulant sur cette ligne.

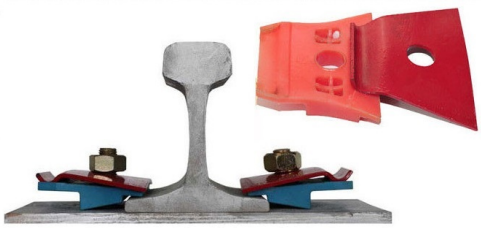


FIGURE 3.7 – Attache de type NABLA

3.3.4 Les appareils de voie

Pour permettre les manœuvres et croisements sur notre ligne (notamment au niveau de la future gare de croisement du tronçon étudié), les appareils de voie retenus sont du type **UIC-60 500-1 :12**, autorisant une vitesse de 65 km/h en voie déviée, compatible avec le trafic mixte voyageurs/fret de la Ligne Minière de l'Est.

3.3.5 Synthèse des choix techniques

Le tableau ci-dessous récapitule l'ensemble des éléments constitutifs de la superstructure retenus pour le projet :

TABLE 3.3 – Synthèse des éléments de la superstructure

Élément	**Référence retenue**	**Zone d'application**
Rail	UIC 60 E1	Ensemble de la voie
Traverses (voie courante)	B440 (Vax U31)	Voie courante
Traverses (appareils de voie)	Bois	Aiguillages et croisements
Attaches	NABLA (tire-fond 22-115, type 5)	Ensemble de la voie
Appareils de voie	UIC-60 1 :12	Gares de croisement

3.4 Conclusion

Le choix des éléments constitutifs de la superstructure constitue une étape déterminante dans la conception d'une voie ferrée. Il conditionne à la fois la sécurité de l'exploitation et l'optimisation économique du projet.

Dans le cadre de notre projet sur la Ligne Minière de l'Est (Section 2), la sélection des rails (UIC 60 E1), des traverses (bois pour appareils de voie, bibloc pour voie courante), des attaches (NABLA) et des appareils de voie (UIC-60 1 :12) permet d'assurer la pérennité de l'infrastructure tout en maîtrisant les coûts de réalisation et de maintenance. Ainsi, l'efficacité globale du projet repose en grande partie sur la qualité de ces choix techniques.

Chapitre IV

Caractéristiques géométriques du tracé

4.1 Principes de conception et valeurs limites

La conception ou l'aménagement de l'infrastructure repose sur le choix d'un tracé optimal. Ce tracé doit garantir la performance de la ligne tout en supportant le passage de convois lourds, qui sollicitent fortement la structure.

Le dimensionnement géométrique de la voie est régi par deux niveaux de critères :

0. **Les valeurs limites normales (La référence de base)** Elles constituent la règle standard du projet. Leur application permet de garantir le meilleur compromis entre :
   - **La performance :** Assurer des vitesses adaptées et une circulation fluide.
   - **La durabilité :** Limiter l'usure des rails et des trains sous l'effet des charges lourdes.
   - **L'économie :** Maîtriser les futurs coûts de maintenance de la voie.

0. **Les valeurs limites exceptionnelles (Les dérogations)** Elles sont réservées aux zones à fortes contraintes géographiques pour éviter des coûts de travaux trop élevés. Leur application impose des règles de tracé très strictes pour garantir la sécurité et la stabilité des trains :
   - **Fréquence maximale :** Une seule tolérance en plan (virage) et une seule en profil (pente) par tranche de 20 kilomètres.
   - **Distance de sécurité :** Interdiction de superposer ces difficultés. Elles doivent être séparées d'au moins 300 mètres.

Validation des choix géométriques au stade APD Dans le cadre de cette étude d'Avant-Projet Détaillé (APD), le recours aux valeurs exceptionnelles est désormais figé et soumis à l'approbation du Maître d'Ouvrage.

Les choix de tracé présentés ici intègrent les résultats des sondages de sol et les contraintes de l'environnement. Toute utilisation de valeurs dérogatoires est ainsi définitivement arbitrée par le donneur d'ordre avant de lancer la phase de construction.

4.2 Le tracé en plan

introduction

Le tracé en plan de la voie ferrée est la projection orthogonale de tous les points sur un plan horizontal. Il se compose généralement d'une série d'alignements droits et d'arcs de cercle, reliés par des courbes de raccordement progressif. L'étude géométrique de ce tracé vise à garantir un roulement parfait et sécurisé des véhicules.

Dans les chemins de fer, on distingue deux vitesses caractéristiques :

— V_v : vitesse des trains rapides (voyageurs).

— V_m : vitesse des trains lents (marchandises).

4.2.1 Conditions à respecter du tracé en plan

L'élaboration du tracé en plan doit satisfaire un ensemble de conditions techniques et économiques :

— Respecter le couloir de passage défini lors de l'étude d'Avant-Projet Détaillé (APD).

— Se conformer aux rayons et longueurs minimales recommandés par la SNTF (Société Nationale des Transports Ferroviaires).

— Suivre les courbes de niveau afin de minimiser les volumes de terrassement.

— Contourner les zones présentant des contraintes géologiques susceptibles de compromettre la stabilité de l'infrastructure.

4.2.2 Les éléments constitutifs du tracé en plan

Un tracé en plan est constitué de trois éléments géométriques :

0. **Alignement** : Tronçon rectiligne
0. **Arc de cercle** : Courbe circulaire de rayon fixe
0. **Courbe de raccordement** : Transition progressive entre alignement et courbe

L'alignement

L'alignement constitue l'élément le plus simple du tracé en plan. Correspondant à un rayon de courbure infini ($R = \infty$), il offre les conditions les plus favorables à l'exploitation ferroviaire en termes de sécurité et de confort.

Arc de cercle

Le passage en courbe génère une force centrifuge d'expression :

$$F_c = \frac{m \cdot V_v^2}{R} \tag{IV.1}$$

Cette force peut entraîner un risque de déraillement et une fatigue prématurée de la voie. Pour compenser cet effet, il est nécessaire d'incliner latéralement la voie, créant ainsi une différence de niveau entre le rail extérieur et le rail intérieur. Cette inclinaison est dénommée **dévers**.

Dévers Théorique

Le dévers théorique correspond à l'inclinaison qui compense intégralement la force centrifuge, garantissant ainsi la stabilité du véhicule et le confort des voyageurs. Il est calculé par la relation suivante :

$$d_{th} = \frac{11,8 \cdot V^2}{R} \tag{IV.2}$$

Avec :

— d_{th} : dévers théorique en (mm)

— V : vitesse de train en (km/h)

— R : rayon de courbe en (m)

Dévers Pratique

Sur les voies mixtes, les trains circulent à des vitesses variables selon leur nature (voyageurs ou marchandises). Il est donc impossible d'adopter un dévers théorique unique. Un dévers pratique est alors défini :

$$d_p = \frac{1000 \cdot C}{R} \tag{IV.3}$$

Avec :

— d_p : dévers pratique en (mm)

— R : rayon en (m)

— C : coefficient de dévers, calculé par $C = 0,006 \cdot V_v^2$ (avec C multiple de 15)

Le dévers pratique doit vérifier la condition :

$$0,5 \cdot d_{th} < d_p < 0,7 \cdot d_{th} \tag{IV.4}$$

La SNTF a retenu pour une vitesse $V \leq 220$ km/h :

Le dévers maximal $d_{p(\max)}$ en pleine courbe :

La valeur de dévers maximal doit satisfaire la condition suivante :

TABLE 4.1 – Valeurs limites du dévers

Valeur recommandée (mm)	160
Valeur exceptionnelle (mm)	180

Insuffisance de dévers

L'insuffisance de dévers correspond à la différence entre le dévers théorique (calculé pour les trains rapides) et le dévers pratique. Elle génère des efforts transversaux non compensés. Pour des raisons de sécurité et de confort, cette insuffisance doit être limitée. On l'appelle l'insuffisance maximale.

L'insuffisance de dévers est exprimée par la formule :

$$I = d_{th(v)} - d_p = \frac{11,8 \cdot V_v^2}{R} - d_p < I_{\max} \tag{IV.5}$$

Avec :

— I : l'insuffisance de dévers (mm)

— $d_{th(v)}$: le dévers théorique des trains voyageurs rapides (mm)

— d_p : dévers pratique (mm)

TABLE 4.2 – Les valeurs limites de l'insuffisance du dévers

Valeur recommandée (mm)	150
Valeur exceptionnelle (mm)	160

Excès de dévers

L'excès de dévers est la différence entre le dévers pratique et le dévers théorique calculé pour les trains lents (marchandises). Cet excès génère des forces transversales dirigées vers l'intérieur de la courbe.

L'excès de dévers est exprimé par la formule :

$$E = d_p - d_{th(m)} = d_p - \frac{11,8 \cdot V_m^2}{R} < E_{\max} \tag{IV.6}$$

Avec :

— E : l'excès de dévers (mm)

— $d_{th(m)}$: le dévers théorique des trains marchandises lents (mm)

— d_p : dévers pratique (mm)

TABLE 4.3 – Les valeurs limites de l'excès du dévers

Valeur recommandée (mm)	110
Valeur exceptionnelle (mm)	130

Rayon Minimum de l'arc de cercle

Le rayon minimal est déterminé pour limiter les effets de la force centrifuge, réduire l'usure des rails et assurer le confort des passagers.

Le dévers correspondant au rayon minimal est donné par :

$$d(R_{\min}) = \frac{E_{\max} \cdot V_{\text{Voy}}^2 + I_{\max} \cdot V_{\text{mar}}^2}{V_{\text{Voy}}^2 - V_{\text{mar}}^2} < d_{p_{\max}} \tag{IV.7}$$

Le rayon minimal retenu est la valeur maximale issue de l'expression suivante :

$$R_{\min} = \frac{11,8 \cdot V_{\max}^2}{I_{\max} + d_p} \tag{IV.8}$$

Courbe de raccordement

Le passage brutal entre un alignement rectiligne et une courbe circulaire génère une accélération transversale instantanée, préjudiciable au confort et à la stabilité. Il est donc nécessaire d'insérer une courbe de raccordement progressif permettant une variation graduelle de l'accélération. Les raccordements progressifs (RP) de type clothoïde sont recommandés.

Les courbes de raccordement sont implantées dans les cas suivants :

— Alignement-courbe

— Deux courbes de mêmes sens avec $R_1 \neq R_2$

— Une courbe et contre-courbe

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

TABLE 4.4 – Les valeurs de la courbure

Alignement-courbe	$\Delta c = 1000/R$
Deux courbes de mêmes sens avec $R_1 \neq R_2$	$\Delta c = 1000/R_1 - 1000/R_2$
Une courbe et contre-courbe	$\Delta c = 1000/R_1 + 1000/R_2$

Les courbes de raccordement sont recommandées si :

$$\Delta c \geq \frac{2000}{V_{\max}^2} \tag{IV.9}$$

Elles sont obligatoires dans les conditions suivantes :

TABLE 4.5 – Limitation de la courbure

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

Variation de dévers dans le raccordement

Lors du franchissement d'un raccordement, le véhicule subit une rotation progressive autour d'un axe parallèle à la voie. Cette rotation, appelée **gauchissement**, doit être limitée pour garantir un roulement régulier. Dans un raccordement parabolique, le dévers varie progressivement de 0 à d_p.

La variation de dévers par rapport à la longueur dd/dl :

$$\frac{dd}{dl} = \frac{d_p}{L_{rp}} \quad \text{en (mm/m)} \tag{IV.10}$$

La variation de dévers par rapport au temps dd/dt :

$$\frac{dd}{dt} = \frac{d_p \cdot V_{\max}}{L_{rp} \cdot 3{,}6} \quad \text{en (mm/s)} \tag{IV.11}$$

Limite de la variation de dévers : La variation de dévers doit satisfaire les conditions suivantes :

TABLE 4.6 – Limite de la variation des dévers

	Limite de la variation de dévers par rapport à la longueur $\frac{dd}{dl}$	**Limite de la variation de dévers par rapport au temps $\frac{dd}{dt}$**
Valeur maximale normale	$\frac{180}{V_v}$ (mm/m)	50 mm/s
Valeur maximale exceptionnelle	$\frac{216}{V_v}$ (mm/m)	60 mm/s

La longueur minimale du raccordement est alors :

$$L_{rp} = \frac{d_p \cdot V_{\max}}{180} \quad \text{(cas normal)} \tag{IV.12}$$

$$L_{rp} = \frac{d_p \cdot V_{\max}}{216} \quad \text{(cas exceptionnel)} \tag{IV.13}$$

Variation de l'insuffisance de dévers dans le raccordement

Lorsque la vitesse du train dépasse sa vitesse d'équilibre, les passagers subissent les effets de la force centrifuge non compensée en raison de l'insuffisance de dévers. Le taux de variation d'insuffisance de dévers doit être limité pour permettre une adaptation progressive et si possible inconsciente du voyageur à ces effets.

La variation d'insuffisance de dévers se détermine par la formule :

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\Delta I}{L_{rp}} \cdot \frac{V}{3,6} \quad \text{(mm/s)} \tag{IV.14}$$

Limite de la variation de l'insuffisance de dévers : La variation de l'insuffisance de dévers doit satisfaire les conditions suivantes :

TABLE 4.7 – Limite de la variation de l'insuffisance de dévers

Valeur recommandée (mm/s)	75
Valeur exceptionnelle (mm/s)	90

4.2.3 Application au projet

Description du tracé de notre projet

Le tracé de rectification commence au PK 53+750, à 1,6 km de la gare de Bouchegouf. La gare se termine au pont-rail sur l'Oued Sibouse. À la sortie du pont, et afin d'éviter la ville de Bouchegouf, le tracé entre immédiatement dans une courbe de rayon 200 m, comprise entre les PK 53+750 et 54+200. Les derniers 200 m de cette courbe du PK 54+000 au PK 54+200 appartiennent au tronçon étudié. Cette section sera traitée à vitesse exceptionnellement réduite de 70 km/h. Le reste du tracé est parcouru à 100 km/h et conduit jusqu'à la gare de dépassement, implantée du PK 61+050 au PK 63+775.
Ce choix de tracé s'oppose à la ligne existante qui bascule vers l'Oued El Mellah. Cette dernière présente des rampes importantes atteignant 30 pour mille, ce qui la rend inadaptée au trafic minier
. L'ensemble du projet vise à gagner en altitude pour s'affranchir des contraintes de la ligne existante. Cette dernière, avec ses rampes de 30 pour mille, se révèle inadaptée au transport minier qui exige des conditions de circulation optimales. Le nouveau tracé privilégie donc des altitudes plus élevées, permettant d'éviter les fortes déclivités et d'assurer un écoulement régulier des trains de minerai.

Selon la SNTF, Pour une vitesse de 100 km/h, le rayon minimal normal est de 381 m donc tous les rayons des courbes du tracé doivent être supérieure au Rmin, correspondant à un dévers max de 160 mm, et d'insuffisance de dévers max de 150 mm
Afin d'éviter la ville de Bouchegouf, et compte tenu de la proximité de cette courbe avec la gare, un rayon de courbure de 200 m est retenu en sortie de gare. Cette valeur, imposée par l'encombrement du site, reste supérieure au rayon minimal de 187 m nécessaire pour une vitesse de 70 km/h. les données suivantes sont disponibles :

TABLE 4.8 – Vérification des coefficients de dévers

Vitesse (km/h)		**C** $0,006V_{max}^2$	***C* adopté**	**Vérification** $\frac{C}{0,0118V_{max}^2}$
Voy	**Mar**			
100	80	60,00	**60,00**	**0,51**

TABLE 4.9 – Paramètres de conception des courbes ferroviaires

Formule	**Application**		**Valeurs**	
	Normal	**Exceptionnel**	**Normal**	**Exceptionnel**
Dévers maximal d (mm)	-	-	160	180
$R_{min} = \frac{11,8V_{max}^2}{d_{max}+I_{max}}$ (m)	$\frac{11,8V_{max}^2}{d_{max}+I_{max}}$	$\frac{11,8V_{max}^2}{d_{max}+I_{max}}$	381	347
Longueurs minimales des alignements (m)	$\frac{V_{max}}{2}$	$\frac{V_{max}}{3}$	50	33
Longueurs minimales des pleines courbes (m)	$\frac{V_{max}}{2}$	$\frac{V_{max}}{3}$	50	33
Insuffisance de dévers admissible I (mm)	-	-	150	160
Excès de dévers admissible E (mm)	-	-	110	130
Limite de la variation de dévers par rapport à la longueur (mm/m)	$\frac{180}{V_{max}}$	$\frac{216}{V_{max}}$	1,80	2,16
Limite de la variation d'insuffisance de dévers (mm/s)	-	-	75	90

TABLE 4.10 – Caractéristiques des courbes

Rayon (m)	d_{th} **(mm)**	d_p **(mm)**	d_p **adopté**	I **(mm)**	E **(mm)**	L_{rp} **(m)**	L_{rp} **adopté**	dd/dL **(mm/m)**	dI/dt **(mm/s)**
400	295,00	150,00	**160**	135,00	−28,80	62,22	**90**	1,78	41,67
600	196,67	100,00	**110**	86,67	−15,87	61,11	**70**	1,57	34,39
800	147,50	75,00	**80**	67,50	−14,40	44,44	**50**	1,60	37,50
900	131,11	66,67	**70**	61,11	−13,91	38,89	**50**	1,40	33,95
400	295,00	150,00	**160**	135,00	−28,80	88,89	**90**	1,78	41,67
420	280,95	142,86	**150**	130,95	−29,81	83,33	**90**	1,67	40,42
575	205,22	104,35	**110**	95,22	−21,34	61,11	**70**	1,57	37,78
500	236,00	120,00	**130**	106,00	−21,04	72,22	**80**	1,63	36,81

NB : Le listing du tracer en plan se trouve en annexe A.

4.3 Le profil en long

Introduction

Établir le profil en long du tracé est une étape fondamentale dans l'évaluation d'un projet ferroviaire, que ce soit du point de vue économique, en évaluant les travaux de terrassement, les déblais, les remblais, ainsi que la nécessité d'ouvrages d'art et de tunnels, ou du point de vue technique, en assurant la conformité aux réglementations en vigueur.

4.3.1 Définition

— **Profil en long du terrain naturel :** C'est la coupe longitudinale du terrain le long du tracé en plan. Ce profil va être le support pour le profil en long.

— **Profil en long du projet :** C'est l'ensemble d'alignements (paliers, pentes, rampes) et de courbes circulaires (convexes, concaves) qui représentent la ligne rouge.

— **Déclivité :** C'est la tangente de l'angle que fait le profil en long avec l'horizontal, elle est dénommée « une pente » pour les descentes et « une rampe » pour les montées.

4.3.2 Élément géométrique du profil en long

Les éléments constitutifs de profil en long se définissent comme suit :

— **Pente :** C'est la partie du tracé qui donne le sens de la ligne rouge qui est en descente.

— **Rampe :** C'est la partie du tracé qui définit la montée.

— **Palier :** C'est la partie de la ligne rouge qui se trouve en horizontale.

— **Courbe de raccordement verticale :** Ce sont des arcs de cercle qui assurent la liaison entre deux éléments de la ligne rouge.

Déclivité maximale Le profil en long de la voie ferrée est caractérisé par des valeurs très faibles de déclivités pour assurer des vitesses de circulation convenables, la sécurité lors du freinage en pente et le confort au démarrage du véhicule en rampe. La déclivité des droites ne peut pas dépasser un certain maximum fixé par la SNTF :

TABLE 4.11 – Les déclivités par rapport aux longueurs

	Normal	**Exceptionnel**
Déclivité maximale (L < 3000 m)	16 ‰	18 ‰
3000 < L > 15000 m	16 ‰à 13 ‰	18 ‰à 15 ‰
L > 15000 m	13 ‰	15 ‰
Gares	0	0

Choix des alignements droits La position des droites dépend de plusieurs facteurs (évitement des terrassements inutiles, équilibre remblais/déblais, emplacements des appareils de voie). Lorsque le train passe par deux déclivités successives de sens opposés, il subit des accélérations verticales brutales. Les éléments de profil en long doivent respecter les longueurs minimales suivantes :

TABLE 4.12 – Les longueurs minimales des éléments de profil en long

Valeur maximale normale	V/2
Valeur maximale exceptionnelle	V/2.5

Choix des cercles C'est un arc de cercle qui assure la liaison entre deux déclivités. Il permet d'assurer le confort et la sécurité des voyageurs en réduisant les accélérations centrifuges.

— Il ne doit pas y avoir d'interférence entre les courbes de transition en plan (clothoïde) et les courbes de raccordement en profil en long.

— Les points de placement des appareils de voie ne doivent pas être en courbe.

TABLE 4.13 – Les valeurs de rayon minimal selon la SNTF

Valeur maximale normale	$0.35V^2$
Valeur maximale exceptionnelle	$0.25V^2$

4.3.3 Application à notre projet

Les paramètres géométriques du profil en long de la SNTF :

TABLE 4.14 – Les valeurs des paramètres de profil en long

	Valeur max. normale	**Valeur max. exceptionnelle**
Rayon de raccordement min.	3500	2500
Longueurs minimales pentes/rampes	50 m	40 m
Déclivité maximum pleine voie	16 ‰	18 ‰
Déclivité maximum en gare	0 ‰	0 ‰

NB : Le listing du profil en long se trouve dans l'annexe A.

4.3.4 Conclusion

On peut conclure que la constitution du profil en long est essentielle pour évaluer un projet ferroviaire, tant sur le plan économique que technique. Cela permet d'examiner les déclivités, la coordination entre le tracé en plan et le profil en long, ainsi que l'emplacement des gares.

4.4 Coordination entre le Profil en Long et le Tracé en Plan

La conception géométrique d'une infrastructure ferroviaire ne peut se résumer à deux études bidimensionnelles indépendantes. Pour assurer la sécurité des circulations à haute vitesse, la stabilité du matériel roulant et le confort optimal des voyageurs, il est impératif de réaliser une coordination tridimensionnelle rigoureuse entre le **tracé en plan** (vue de dessus) et le **profil en long** (vue en élévation). Une mauvaise superposition des éléments géométriques peut générer Des illusions visuelles (pertes de tracé) et des cumuls d'accélérations dynamiques néfastes.

4.4.1 Exigences fondamentales de la coordination géométrique

L'optimisation du tracé repose sur le respect strict de quatre exigences fondamentales, dictées par des impératifs de confort visuel, de sécurité mécanique et de logique d'exploitation :

0. **Déphasage des courbes (Confort visuel)**
   - *Principe :* Ne placez jamais un changement de pente (raccordement vertical) immédiatement après le début d'un virage (courbe horizontale).
   - *Raison :* Le déphasage des courbes évite l'effet visuel de « cassure » ou de perte de tracé pour le conducteur. De plus, il fluidifie l'introduction des forces et adoucit la transition des sollicitations dynamiques subies par la voie.
0. **Zones des Appareils de Voie (Sécurité mécanique)**
   - *Principe :* Les appareils de voie (aiguillages, traversées) doivent être installés strictement sur des sections rectilignes (**alignements droits**) et en **palier**, avec une déclivité maximale tolérée qui ne dépasse pas $2,5\,‰$.
   - *Raison :* Cette règle proscrit l'accumulation simultanée de forces complexes (accélération transversale en virage, effort de traction/freinage en pente et discontinuité géométrique de la roue sur l'aiguille). Le respect de ce principe prévient l'usure prématurée des cœurs d'aiguille et minimise drastiquement le risque de déraillement par chevauchement du boudin de roue.
0. **Zone de la Gare (Exploitation et sécurité)**
   - *Principe :* Réserver un espace plan continu (en palier rigoureux) sur une longueur minimale de 900 à 1500 mètres pour l'implantation des gares voyageurs ou de triage.
   - *Raison :* Cet espace rectiligne et horizontal est dimensionné pour accueillir la longueur utile des trains de long parcours, intégrer les appareils de voie de bifurcation en entrée/sortie, et garantir l'immobilité absolue des rames à l'arrêt, immunisant le système contre tout risque de dérive spontanée par gravité en cas de défaillance des freins.
0. **Dissociation des points de transition (Stabilité dynamique)**
   - *Principe :* Les points singuliers de changement de déclivité doivent se situer soit en plein alignement droit horizontal, soit au cœur d'une courbe horizontale constante (zone circulaire pure).

— *Raison :* Cette dissociation géométrique empêche la superposition des variations d'accélération verticale (liée au profil en long) et transversale (liée aux zones de transition du tracé en plan, comme les clothoïdes), éliminant ainsi les « chocs » cinématiques ressentis par les voyageurs et réduisant la fatigue des composants du rail.

4.4.2 Les Étapes Chronologiques de Conception

L'application pratique de ces critères suit un processus d'ingénierie séquentiel et itératif, structuré en quatre grandes étapes :

Fixation des contraintes majeures (Les nœuds du projet)

Le premier contact se fait sur le fond du plan topographique. Les zones géographiques intangibles doivent être configurées en palier. L'emplacement de la gare (900 à 1500 m plats) et les zones de bifurcation principales forment les *points d'ancrage rigides* qui ne peuvent pas être modifiés dans le futur profil en long.

Dessin du Tracé en Plan (Vue de dessus)

Le concepteur définit la géométrie horizontale de la ligne en reliant les alignements droits par des courbes circulaires. L'introduction progressive de la courbure et du dévers s'effectue au moyen de courbes de transition spécifiques, généralement des **clothoïdes**, assurant une variation linéaire de l'accélération centrifuge.

Modélisation et Optimisation du Profil en Long (Vue en Élévation)

L'élaboration du profil en long repose sur l'ajustement rigoureux de l'enchaînement des déclivités (pentes et rampes). Le domaine ferroviaire impose exclusivement l'usage de **raccordements circulaires** pour lier les variations de pente, garantissant ainsi la régularité de l'accélération verticale. Pour assurer le confort dynamique et la stabilité des circulations, les sommets et les points de tangence de ces raccordements verticaux doivent impérativement être projetés en dehors des zones de transition (courbes de raccordement) du tracé en plan. Cette configuration permet d'éviter la superposition des sollicitations géométriques tridimensionnelles, notamment la combinaison de la torsion de la voie en plan et de la courbure du profil en long. On applique ainsi la règle empirique du découplage cinématique, qui impose un décalage longitudinal minimal ($L_{\min}$) proportionnel à la vitesse de conception de la ligne :

$$L_{\min} = 0,25V \tag{IV.15}$$

Où $L_{\min}$ représente la distance minimale de sécurité pour le découplage géométrique en mètres (m) et V correspond à la vitesse de projet de la ligne en kilomètres par heure (km/h).

Vérification de la cohérence 3D (Rapport des rayons)

La dernière validation consiste à vérifier l'harmonie visuelle et mécanique tridimensionnelle. Le profil en long doit toujours présenter une souplesse géométrique nettement supérieure à celle du tracé horizontal. Par conséquent, le rayon du raccordement circulaire vertical (R_v) doit être largement prépondérant face au rayon de la courbe horizontale locale (R_h). La règle de l'art

ferroviaire impose la condition suivante :

$$R_v \geq 10R_h \tag{IV.16}$$

NB : Le trace combinee se trouve dans l'annexe B.

Chapitre V

Hydrologie et Hydraulique

5.1 Introduction

Ce chapitre porte sur l'analyse des éléments hydrologiques et hydrauliques nécessaires à la réalisation du projet de modernisation de la ligne minière. Le tronçon de voie ferrée étudié traverse un certain nombre de bassins versants qu'il convient de caractériser afin de dimensionner et d'assurer le bon fonctionnement des ouvrages de drainage et de décharge.

5.2 Localisation hydrologique et réseau hydrographique

5.2.1 Localisation du projet

Du point de vue hydrologique, le tracé de la ligne minière (Section Centre, Tronçon du PK 54+000 au PK 64+000) traverse le grand bassin versant de l'oued Seybouse, codé sous le numéro 16 par les services de l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH).

À l'échelle régionale, les caractéristiques globales de ce grand sous-bassin hydrographique sont consignées dans le tableau V.1.

TABLE 5.1 – Caractéristiques macro-hydrologiques du bassin de l'Oued Seybouse Maritime

N° SB	Oued	S (km^2)	P (km)	Lw (km)	Kc	L (km)	l (km)	Dd	Hmin (m)	Hmax (m)	H
1406	O. Seybouse Maritime	1062,7	178,1	1076,7	1,5	74,8	14,2	1,0	0	1000	

— **N° SB** : Numéro du sous-bassin versant (code ANRH) ;

— **Oued** : Nom de l'écoulement principal du sous-bassin ;

— **S** : Surface du sous-bassin versant ;

— **P** : Périmètre du sous-bassin versant ;

— **Lw** : Longueur du cours d'eau principal ;

— **Kc** : Indice de compacité de Gravelius (sans unité) ;

— **L** et **l** : Longueur et largeur du rectangle équivalent ;

— **Dd** : Densité de drainage ;

— **Hmax**, **Hmin**, **Hmoy** : Altitudes maximale, minimale et moyenne du sous-bassin.

5.2.2 Le réseau hydrographique de l'Oued Seybouse

L'oued Seybouse naît dans les hautes plaines semi-arides sur le revers méridional de l'Atlas Tellien et s'écoule du Sud vers le Nord. Son régime est fortement influencé par ses affluents de rive droite et de rive gauche, prenant un caractère typiquement méditerranéen dans son cours inférieur.

Après avoir franchi l'Atlas tellien, l'oued se fraie une voie entre Bouchegouf et Drean à travers la zone septentrionale du Tell. Il reçoit notamment en rive gauche l'oued Ressoul, un affluent dynamique drainant une zone humide. Dans la plaine de Guelma-Bouchegouf, l'oued Seybouse s'étire sur plus de 45 km. Les oueds Charef (36,46 km) et Bouhamdane (45,37 km) se rejoignent au niveau de Medjez Amar pour former l'artère principale de la Seybouse. Près de Drean, l'oued décrit des méandres complexes comportant des captures et des bras morts (comme le khelidj de Khamissa, ancien bras fonctionnel lors des fortes crues) avant de se jeter dans la mer Méditerranée au niveau de la plaine littorale d'Annaba.

TABLE 5.2 – Principaux affluents formant l'Oued Seybouse (Wilaya de Guelma)

Cours d'eau	**Longueur** (km)	**Apport annuel** (hm^3/an)
Oued Charef	36,46	107
Oued Bouhamdane	45,37	96
Oued Mellah	–	151

5.3 Caractéristiques climatiques et pluviométriques

5.3.1 Régime des températures

La zone d'étude subit un climat méditerranéen à hivers froids et étés chauds. Les températures moyennes annuelles oscillent entre 15,6 °C et 17,6 °C au droit des stations de Guelma et de Souk Ahras (période 1978–2004). Au niveau de la station littorale d'Annaba, la moyenne annuelle s'élève à 17,7 °C (période 1972–2005).

TABLE 5.3 – Moyennes mensuelles et annuelles des températures (°C) de la station de Guelma

Station	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Déc**	**Jan**	**Fév**	**Mar**	**Avr**	**Mai**	**Juin**	**Juil**	**Août**	**Moy**
Guelma	23,8	19,6	14,3	11,0	9,7	10,3	12,2	14,4	18,7	23,5	26,7	27,4	17,6

Source : Office National de la Météorologie (ONM)

5.3.2 Analyse de la pluviométrie

Les données pluviométriques proviennent de l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH) et de l'Office National de la Météorologie (ONM). L'analyse de l'extrait de la carte pluviométrique de

l'Algérie du Nord au 1/500 000 indique que la hauteur de précipitation annuelle varie à l'échelle de la région entre 350 mm et 1000 mm.

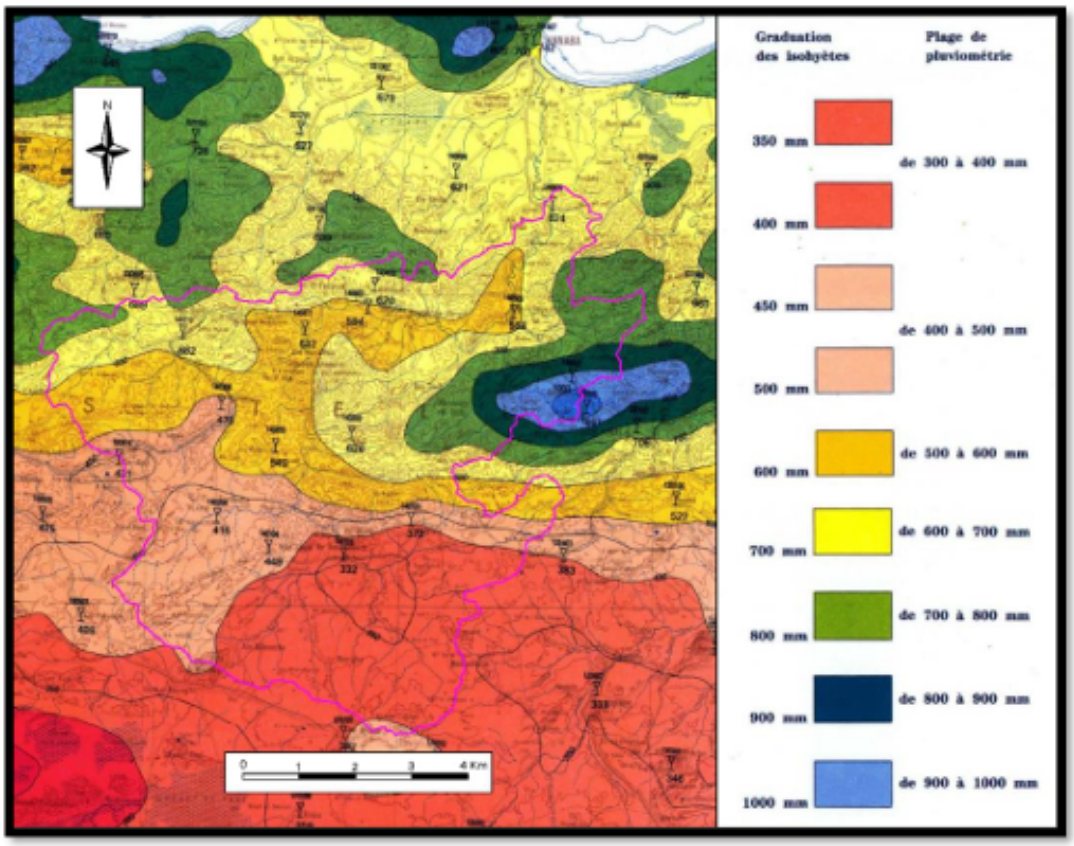


FIGURE 5.1 – Extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000 (Secteur Bouchegouf – Souk Ahras).

5.3.3 Pluies de courte durée et courbes IDF

L'évaluation des intensités de pluies s'appuie sur les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) issues des enregistrements de la station de Guelma (Figure V.2).

La relation Intensité-Durée-Fréquence est modélisée selon la formulation mathématique de Montana :

$$I(t,T) = \frac{a(T)}{t^b} \tag{V.1}$$

Où :

— $I(t,T)$ est l'intensité maximale de la pluie (mm/h) ;

— T est la période de retour (années) ;

— t est la durée de la sollicitation pluvieuse $(heures)$;

— $a(T)$ et b sont les paramètres climatiques locaux de Montana (Tableau V.4).

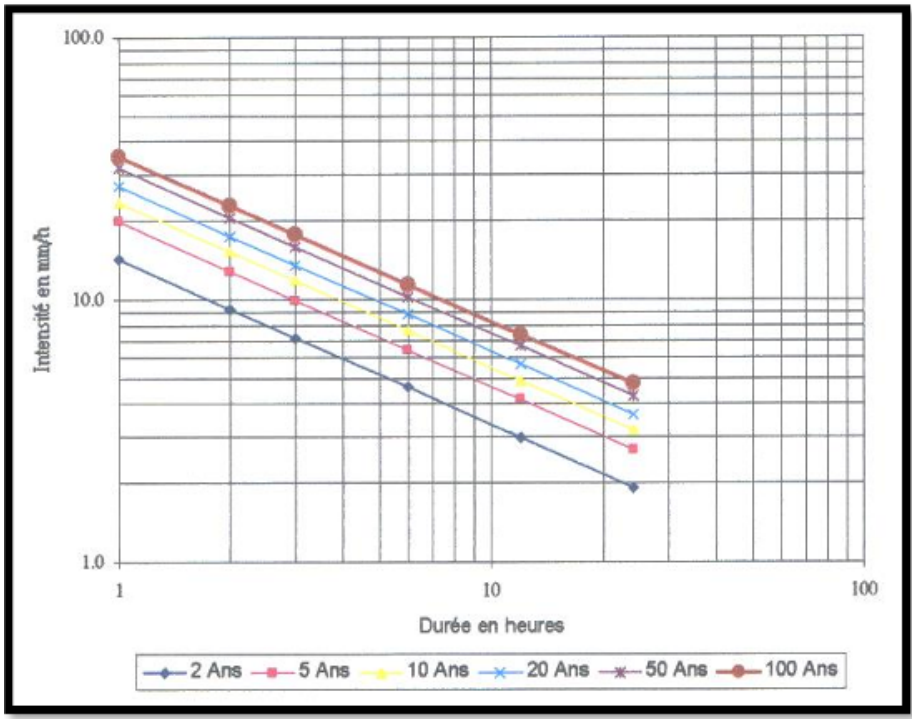


FIGURE 5.2 – Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) de la station de Guelma.

TABLE 5.4 – Paramètres de Montana (a et b) pour la station de Guelma

Période de retour T (ans)	**Paramètre $a(T)$**	**Paramètre b**
2	14,3	0,63
5	19,9	0,63
10	23,7	0,63
20	27,2	0,63
50	31,9	0,63
100	35,3	0,63

5.3.4 Contexte du projet

Le présent tronçon ferroviaire s'inscrit dans le cadre de la réalisation du tronçon Bouchegouf / Souk Ahras / Drea sur 121 km. L'étude hydraulique vise à définir les ouvrages hydrauliques nécessaires pour le passage des oueds sous la voie ferrée, en assurant la transition des débits dans des conditions satisfaisantes.

5.3.5 Méthodologie de calcul

Choix de la crue de projet

Le dimensionnement de tous les ouvrages hydrauliques est calculé pour la **crue centennale** (période de retour de 100 ans), en relation avec les risques assumés par l'infrastructure ferroviaire.

Standardisation des ouvrages

La standardisation des ouvrages hydrauliques mineurs permet de faciliter les travaux de mise en œuvre et de réduire les coûts de construction. Les dimensions standardisées retenues sont :

— Dalot : 1,5 m 1,5 m

— Dalot : 2,0 m 1,5 m

— Dalot : 4,0 m 4,0 m

Formule de Manning-Strickler

Le calcul hydraulique est réalisé à l'aide de la formule de **Manning-Strickler** :

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot S \cdot I^{1/2} \tag{V.2}$$

Où :

— Q : débit en m^3/s

— n : coefficient de rugosité

— S : section mouillée en m^2

— P : périmètre mouillé en m

— I : pente

— R_H : rayon hydraulique en m, avec $R_H = \dfrac{S_m}{P_m}$

Les paramètres de calcul adoptés sont :

— Coefficient de rugosité $k = 70$ (ouvrages en béton)

— Hauteur utile = 80 % de la hauteur totale

5.4 Méthodologie d'évaluation des crues de projet

La maîtrise des débits de pointe (Q_{max}) est capitale pour préserver la plateforme ferroviaire contre l'érosion et les submersions. Le choix de la crue de projet pour le dimensionnement des structures hydrauliques est fixé à la **crue centennale** (Q_{100}).

Les paramètres morphométriques des sous-bassins versants interceptés par le tracé ont été extraits par digitalisation des cartes topographiques sous le logiciel AutoCAD (2019). L'indice de compacité de Gravelius est calculé par :

$$K_c = 0,28\frac{P}{\sqrt{S}} \tag{V.3}$$

5.4.1 Temps de concentration (T_c)

Le choix des formules empiriques de calcul du temps de concentration est dicté par la superficie (S) du bassin versant considéré :

a) Superficie $S < 5$ km^2 (Formule de Ventura) :

$$T_c = 0,127\sqrt{\frac{S}{I}} \tag{V.4}$$

b) Superficie $5 \leq S \leq 25$ km^2 (Formule de Passini) :

$$T_c = 0,11\frac{\sqrt{SL}}{\sqrt{I}} \tag{V.5}$$

c) Superficie $S > 25$ km^2 (Formule de Giandotti) :

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L_w}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \tag{V.6}$$

Où I représente la pente moyenne (m/m) et L ou L_w la longueur du cours d'eau principal (km).

5.4.2 La Formule Rationnelle

Appliquée principalement pour les bassins de surface modérée ($S \leq 10$ km^2) :

$$Q_{max} = C_r I S \tag{V.7}$$

Où C_r est le coefficient de ruissellement global, calculé suivant l'approche matricielle de **Kenessey** :

$$C_r = C_1 + C_2 + C_3 \tag{V.8}$$

— C_1 **(Composante Pente)** : Évaluée à partir de la carte des pentes (Figure V.3). Les versants montagneux de la chaîne Numidienne présentent des pentes fortes (Classe 3 : 33 % à 180 %), tandis que les plaines d'oued s'inscrivent dans la Classe 1 (0 %–17 %).

— C_2 **(Composante Lithologie/Perméabilité)** : Estimée à l'aide des cartes géologiques au 1/50 000 de Bouchegouf et Souk Ahras. Les formations dominantes étant composées de grès et d'argiles numidiennes imperméables, une valeur maximale de $C_2 = 0,30$ a été majoritairement retenue.

— C_3 **(Composante Couverture végétale)** : Déduite des cartes d'affectation des terres de la région (champs de labours et zones forestières éparses).

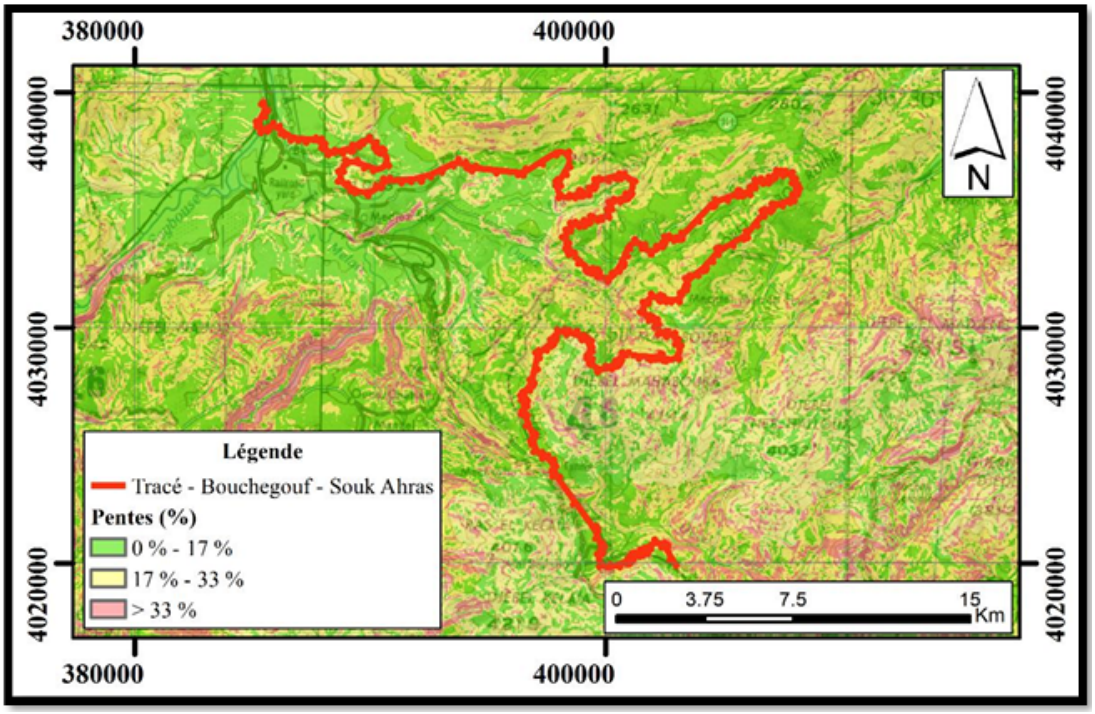


FIGURE 5.3 – Carte des classes de pentes de la zone d'étude.

5.4.3 La Formule de Crupedix

Pour les bassins versants dont la superficie excède 10 km^2, le débit de pointe décennal (Q_{10}) est déterminé par l'expression de Crupedix :

$$Q_{10} = RP_{10}S^{0,8} \tag{V.9}$$

Où R est le coefficient régional d'aptitude au ruissellement ($R = 1,5$ à $1,8$ pour les sols imperméables de la zone) et P_{10} correspond à la pluie journalière décennale (mm).

Le débit centennal (Q_{100}) est ensuite déduit par application d'un facteur d'abattement ou d'amplification b' :

$$Q_{100} = b'Q_{10} \quad \text{avec} \quad b' = \frac{Q_{R,\text{Rationnelle}}(100)}{Q_{R,\text{Rationnelle}}(10)} \text{ pour } S \leq 20 \text{ km}^2 \text{ (et } b' \geq 2 \text{ au-delà)} \tag{V.10}$$

5.5 Résultats et vérification du calage des ouvrages

5.5.1 Récapitulatif des débits des bassins versants

Le tableau V.5 résume les débits centennaux de projet issus de l'analyse hydrologique pour la Section 01.

TABLE 5.5 – Valeurs des débits centennaux (Q_{100}) calculés pour le Tronçon centre, Section 01 : Bouchegouf – Souk Ahras.

N° BV	PK	Q_{100} (m^3/s)
1	PK 54 + 487	53,0
2	PK 58 + 380	8,6
3	PK 58 + 811	7,7
4	PK 58 + 959	39,4
5	PK 59 + 049	9,5
6	PK 59 + 590	23,2
7	PK 60 + 221	15,1
8	PK 60 + 629	4,0
9	PK 61 + 198	2,6
10	PK 61 + 919	5,1
11	PK 62 + 480	2,4
12	PK 63 + 350	2,7

5.5.2 Vérification hydraulique des structures de drainage et d'art

Le tableau V.6 rassemble le dimensionnement et les propositions d'aménagement hydraulique confrontés aux contraintes des Ouvrages d'Art (OA) de la ligne.

5.5.3 Analyse de cohérence et interprétation des résultats

L'examen minutieux des correspondances entre les débits de projet (Q_a) et la géométrie des exutoires permet de valider la transparence hydraulique globale du projet :

— **Validation des Dalots Types :** Le dalot majeur du PK 54+487 ($4,04,0$ m) présente une capacité de saturation $Q_s = 63,0$ m^3/s, ce qui sécurise parfaitement le passage du flux torrentiel du BV 1 ($Q_a = 53,0$ m^3/s) avec une revanche supérieure aux 20 % réglementaires. De même, les dalots standardisés aux PK 61+919, 62+480 et 63+350 équilibrent correctement le transit des petits bassins versants.

— **Intégration des Viaducs Mixtes :** L'affectation des forts débits vers les grandes brèches d'Ouvrages d'Art résout les conflits majeurs d'accumulation. Le viaduc OA 4 (PK 58+850 au PK 59+150) collecte efficacement les exutoires des PK 58+959 et 59+049. De plus, la forte crue du BV 4 ($39,4$ m^3/s initialement affectée au PK 58+811) se trouve idéalement dissipée par l'ouverture naturelle de ce même ouvrage d'art, évitant un surdimensionnement sous remblai.

TABLE 5.6 – Dimensions des ouvrages de drainage (Tronçon centre, Section 01)

N°	PK	Qa	Cel.	b	ht	Qs	Observation
1	PK 54 + 487	53,0	1	4,0	4,0	63,0	Proposer dalot 4 4
2	PK 58 + 380	-	-	-	-	-	Proposer dalot 1,5 1,5
3	PK 58 + 811	39,4	-	-	-	-	Assainissement longitudinal (déblai)
4	PK 58 + 959	-	-	-	-	-	Déverser dans le viaduc PK 58+850 au PK 59+150
5	PK 59 + 049	8,6	-	-	-	-	Déverser dans le viaduc PK 58+850 au PK 59+150
6	PK 59 + 590	7,7	-	-	-	-	Proposer dalot 1,5 1,5
7	PK 60 + 221	9,5	-	-	-	-	Déverser dans le viaduc PK 60+100 au PK 60+400
8	PK 60 + 629	23,2	-	-	-	-	Proposer dalot 2 1,5
9	PK 61 + 198	2,6	-	-	-	-	Assainissement longitudinal (déblai)
10	PK 61 + 919	4,0	1	1,5	1,5	5,3	Proposer dalot 1,5 1,5
11	PK 62 + 480	5,1	1	2,0	1,5	3,3	Dalot (V_e : 7,9 m/s)
12	PK 63 + 350	2,6	1	1,5	1,0	2,9	Dalot (V_e : 3,5 m/s)

5.6 Conclusion

L'étude hydrologique et hydraulique menée sur cette section critique de 10 km (PK 54+000 au PK 64+000) a permis de sécuriser le comportement hydro-dynamique de la nouvelle ligne minière vis-à-vis des crues centennales de l'Oued Seybouse. La caractérisation morphométrique automatisée sous AutoCAD, couplée aux distributions de Montana propres à la station de Guelma, a fourni un modèle d'apport fiable s'étendant de débits modestes de $2,4\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$ jusqu'à des décharges majeures de $53,0\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$.

La stratégie de calage des exutoires transversaux répond parfaitement aux contraintes géomorphologiques locales : là où les lignes de relief s'avèrent encaissées, le report des écoulements vers les viaducs mixtes acier-béton garantit une transparence absolue. Parallèlement, l'implantation de dalots en béton armé dimensionnés par la méthode de Manning-Strickler intercepte les écoulements diffus tout en maintenant les hauteurs d'eau sous le seuil critique des 80 %. Complété par des dispositifs d'assainissement longitudinaux au droit des zones de déblai, ce schéma directeur hydraulique confère à l'infrastructure une protection pérenne, validant ainsi les choix techniques de l'Avant-Projet Détaillé (APD).

Chapitre VI

Géologie et Géotechnique

6.1 Géologie

La région d'étude se situe à l'extrême Est algérien, sur le territoire de la wilaya de Guelma.

6.1.1 Situation géographique de la zone d'étude

La wilaya de Guelma est une wilaya algérienne située dans le nord-est du pays, au cœur de la région de l'Est. Elle est composée de 10 communes et 6 daïras, avec une population de 482 430 habitants (2008) et une superficie de l'ordre de 4 101 km².



FIGURE 6.1 – Localisation de la wilaya de Guelma

La wilaya de Guelma est limitée :

— Au nord par la wilaya d'Annaba ;

— À l'est par la wilaya d'El Tarf ;

— Au sud par la wilaya de Souk Ahras ;

— À l'ouest par les wilayas de Constantine et de Skikda.

6.1.2 Cadre géologique de la zone d'étude

Sur le plan géologique, une partie du tracé se situe au sein d'un vaste bassin d'effondrement (graben) qui s'ouvre sur le littoral méditerranéen. Cette zone est ponctuée par quelques horsts résiduels, tels que les massifs gréseux observés au centre de la dépression (au niveau de Daroussa). Le remplissage géologique du bassin (daté du Mio-Pliocène au Quaternaire) se compose de trois faciès principaux :

— **Faciès marin :** le plus ancien, composé de marnes bleues avec des intercalations calcaires.

— **Faciès fluvial :** dynamique, constitué de galets, de sables et d'argiles déposés le long du réseau hydrographique.

— **Faciès continental :** associé aux dépôts comblant les fosses d'effondrement.



FIGURE 6.2 – Situation du tronçon sur la carte géologique de Bouchegouf

6.1.3 Cadre lithologique général de la zone d'étude

Le cadre lithologique de la région de Bouchegouf

L'étude lithologique de la zone révèle deux ensembles principaux : les formations quaternaires et les formations oligocènes.

Les formations quaternaires Ces formations couvrent la majeure partie de la zone d'étude et sont principalement d'origine continentale (nappes d'épandage, éboulis, limons et terrasses fluviatiles). Le réseau hydrographique, dominé par l'Oued Seybouse et l'Oued Mellah, a façonné trois niveaux de terrasses alluviales distincts :

— **Basse terrasse :** Constituée du lit actuel de l'Oued, elle présente une épaisseur de 5 m. Elle est composée de cailloutis et de limons issus de la fragmentation des conglomérats.

— **Moyenne terrasse :** Présente plus ponctuellement sur l'Oued Mellah, elle atteint 15 m d'épaisseur. Elle est composée de conglomérats, cailloutis, galets et blocs de grès provenant de la nappe numidienne.

— **Haute terrasse :** Il s'agit de la formation la plus puissante avec une épaisseur de 150 m, composée essentiellement d'argiles et de conglomérats.

Les formations oligocènes Ces formations constituent le substratum des reliefs montagneux de la chaîne numidienne. Elles sont caractérisées par des dépôts de grès et d'argiles numidiennes, offrant une transition géologique marquée avec les formations alluviales quaternaires plus récentes.

6.1.4 Sectorisation géologique

D'après la carte géologique de Bouchegouf, les formations géologiques traversées sont essentiellement d'âge quaternaire et oligocène avec quelques affleurements d'âge crétacé. On trouve :

— **Du PK 54+000 au PK 56+000 environ :** les formations traversées correspondent à des formations quaternaires constituant la plaine alluviale de l'Oued Seybouse sous forme de terrasses alluviales (Alluvions de la basse, moyenne et haute terrasse).

— **Du PK 56+000 au PK 64+000 environ :** les formations traversées correspondent à des formations oligocènes qui constituent la chaîne numidienne. Ces formations sont constituées par des argiles et des grès du numidien.

6.1.5 Cadre sismique

D'après le Règlement Parasismique Algérien (RPA 99 / version 2003), publié par le Centre de Génie Parasismique (C.G.S), la wilaya de Guelma est classée en zone à sismicité moyenne **« Zone II.a »**. Le document technique réglementaire subdivise le territoire national en cinq zones de sismicité croissante :

— Zone 0 : sismicité négligeable ;

— Zone I : sismicité faible ;

— Zone IIa et IIb : sismicité moyenne ;

— Zone III : sismicité élevée.

Le niveau minimal de protection sismique accordé à un ouvrage dépend de sa situation et de son importance vis-à-vis des objectifs fixés. Tout ouvrage doit être classé dans l'un des quatre groupes définis ci-après :

— Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale ;

— Groupe 1B : Ouvrages de grande importance ;

— Groupe 2 : Ouvrages courants ou d'importance moyenne ;

— Groupe 3 : Ouvrages de faible importance.

6.2 Programme d'investigation géotechnique

Pour caractériser au mieux les sols du tracé, un programme d'investigation rigoureux a été mis en œuvre. Le tableau VI.1 détaille la répartition des essais selon la nature des lots concernés.

TABLE 6.1 – Programme d'investigation géotechnique par lot

Lot	**Essais in situ**	**Essais au laboratoire**
Lot Terrassement (Dimensionnement de la plate-forme ferroviaire) Remblais / Déblais	— Puits de reconnaissance avec prélèvement d'échantillon paraffiné par couche — Sondages carottés	— Essais d'identification physique (G, γ, W, Ip...) — Essais mécaniques — Analyse chimique
Lot Ouvrage d'art (Dimensionnement des fondations)	— Sondages pressiométriques — Sondages carottés — Essais de pénétration standard (SPT)	— Essais d'identification physique (G, γ, W, Ip...) — Essais mécaniques — Analyse chimique

Synthèse : Le programme d'investigations met en évidence une approche duale adaptée aux contraintes du projet. Le lot terrassement se concentre sur l'identification physique et la caractérisation superficielle en puits pour la géométrie de la plateforme, tandis que le lot ouvrages d'art privilégie des essais *in situ* profonds et rhéologiques (pressiomètre, SPT) indispensables pour la tenue des fondations.

6.2.1 Objectifs des reconnaissances

Les objectifs spécifiques associés à chaque technique d'exploration retenue dans le programme sont explicités dans le tableau VI.2.

TABLE 6.2 – Objectifs des investigations géotechniques

Désignation	**Objectifs**
Sondage carotté	– Distinction des types de formation – Prélèvement des échantillons
Essais de pénétration standard (SPT)	– Détermination de la succession des différentes couches de sol – Capacité portante du sol
Les puits de reconnaissance	Déterminer la portance du sol et caractériser les propriétés géotechniques des matériaux rencontrés.

Synthèse : L'articulation de ces techniques répond au besoin de corréler la lithologie exacte (obtenue par carottage) avec les propriétés de résistance dynamique du terrain (mesurées par SPT) et les aptitudes au compactage en surface (définies via les puits de reconnaissance).

6.2.2 Implantation des points de sondage

L'ensemble des opérations de reconnaissance a été spatialisé le long du tracé. Le tableau VI.4 récapitule l'implantation géométrique et la profondeur de chaque point d'investigation.

TABLE 6.4 – Sondages réalisés sur le tronçon étudié

Sondage	PK	Profondeur (m)	X (m)	Y (m)
SP1-B-OK	53+750	10	385297	4038497
F-1-B-OK	53+775	20	385300	4038522
SP2-B-OK	55+025	10	386237	4038435
F-2-B-OK	55+300	20	386414	4038238
PU1-B-OK	57+300	4.0	388220	4037595
PDL1-B-OK	58+150	refus	388971	4036976
PU2-B-OK	59+050	4.0	389691	4037934
SP3-B-OK	59+300	20	389961	4037965
F-3-B-OK	59+300	20	389961	4037958
PU3-B-OK	60+150	4.0	390531	4037464
SP4-B-OK	60+550	15	390695	4037136
PDL2-B-OK	60+575	refus	390691	4037105
PU4-B-OK	62+050	4.0	389462	4037010
SP5-B-OK	62+550	10	388983	4036983
SP6-B-OK	63+600	10	388871	4036121
PDL3-B-OK	63+825	refus	389046	4036006
F-4-B-OK	64+025	20	389082	4035595
PDL4-B-OK	64+850	refus	390018	4035860

Synthèse : Le maillage des sondages couvre de manière homogène le tronçon du PK 53+750 au PK 64+850. La profondeur d'investigation varie de 4 mètres pour les puits superficiels jusqu'à 20 mètres pour les forages profonds, assurant une reconnaissance optimale tant pour la couche de forme que pour le substratum des ouvrages d'art.

6.3 Résultats obtenus et interprétations

6.3.1 Essais in-situ

Sondages carottés

Au sens de la norme XP P94-202, un échantillon non remanié doit être prélevé dans des conditions modifiant le moins possible la nature et l'état du terrain. Le carottage permet d'obtenir un échantillon continu de sol faiblement ou pas remanié, prélevé à l'aide d'un outil appelé carottier. On distingue deux grandes familles : les carottiers poinçonneurs et les carottiers rotatifs.

Les sondages carottés réalisés nous ont permis de déterminer la nature des formations en place et de récupérer des échantillons intacts transmis au laboratoire pour subir les différents essais physiques et mécaniques.

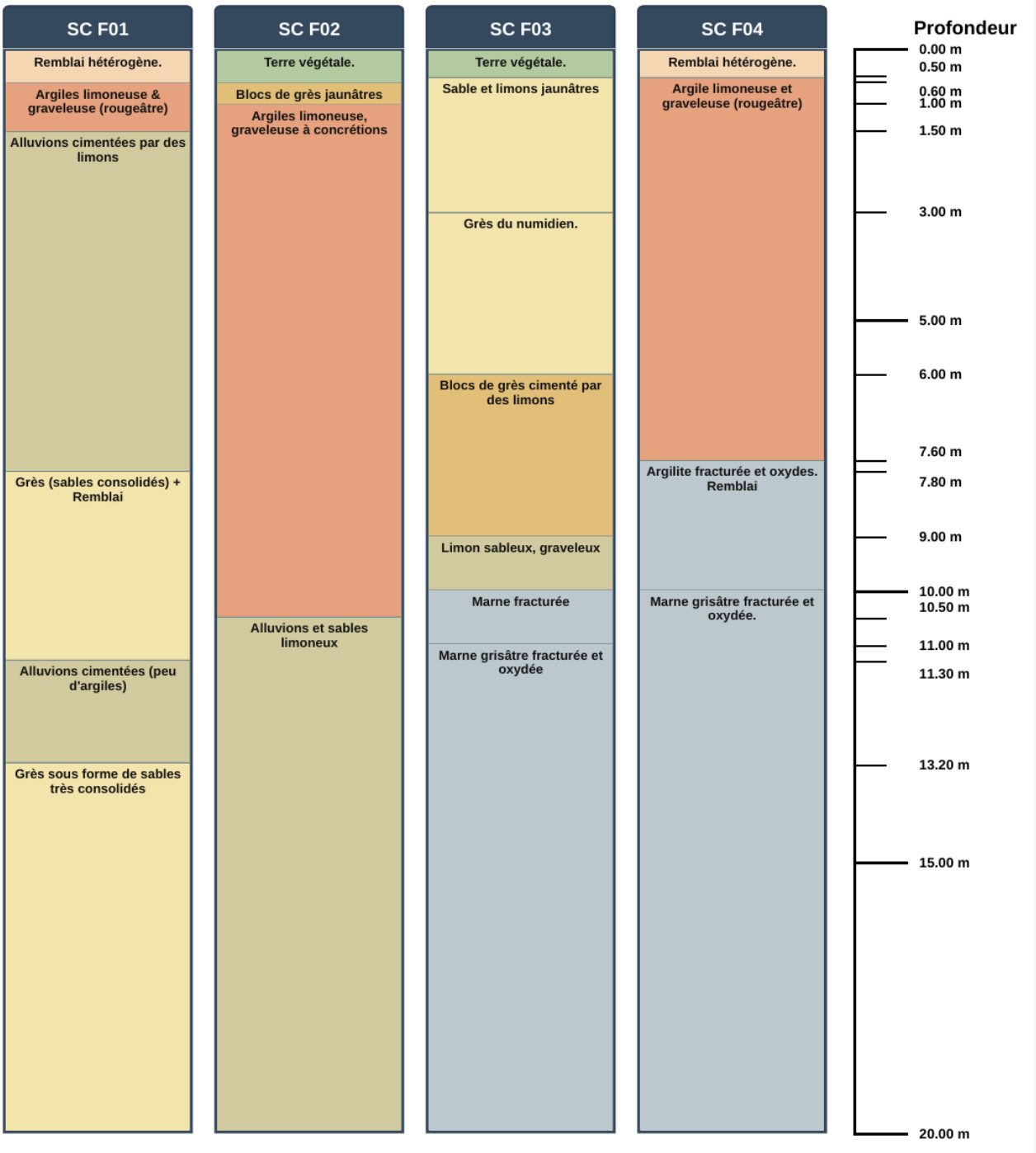


FIGURE 6.3 – Coupe des sondages carottés

SPT (Standard Penetration Test)

L'essai de pénétration standard (SPT) constitue un outil fondamental de la reconnaissance géotechnique, permettant d'évaluer in situ la compacité des formations meubles et la résistance dynamique des différents horizons du sol. Dans le cadre de cette étude, quatre sondages pénétrométriques (notés PDL1, PDL2, PDL3 et PDL4) ont été réalisés afin de cartographier la structure globale du terrain.

Le tableau VI.5 regroupe les valeurs du coefficient multiplicateur et de la résistance de pointe (*RP*) enregistrées tous les 20 cm en fonction de la profondeur.

TABLE 6.5 – Synthèse des résultats des sondages pénétrométriques (PDL1 à PDL4)

Sondage	PDL1	PDL1	PDL2	PDL2	PDL3	PDL3	PDL4	PDL4
Profondeur (m)	**Coef.Multi**	**RP**	**Coef.Multi**	**RP**	**Coef.Multi**	**RP**	**Coef.Multi**	**RP**
0,2	18	155	12	103	11	95	2	17
0,4	21	181	25	215	21	181	4	34
0,6	19	163	21	181	22	189	3	26
0,8	19	163	17	146	30	258	3	26
1,0	22	174	11	87	52	411	5	40
1,2	20	158	12	95	52	411	4	32
1,4	12	95	18	142	100	790	3	24
1,6	12	95	23	182	Refus		7	55
1,8	21	166	25	198			6	47
2,0	32	237	22	163			6	44
2,2	10	74	27	200			4	30
2,4	8	59	31	229			7	52
2,6	8	59	30	222			9	67
2,8	7	52	35	259			12	89
3,0	6	41	31	214			11	76
3,2	6	41	39	269			13	90
3,4	17	117	38	262			15	104
3,6	37	255	41	283			17	117
3,8	43	297	44	304			15	104
4,0	100	640	48	307			18	115
4,2	Refus		47	301			21	134
4,4			49	314			23	147
4,6			52	333			20	128
4,8			100	640			21	134
5,0			Refus				26	159
5,2							22	134
5,4							25	153
5,6							32	195
5,8							39	238
6,0							47	268
6,2							52	296
6,4							61	348
6,6							74	422
6,8							100	570
7,0							Refus	

Synthèse : L'analyse des profils montre des comportements très hétérogènes le long du site :

— **PDL1** présente une compacité initiale correcte interrompue par une anomalie très lâche entre 2,2 et 3,2 m ($RP = 41$), avant d'atteindre son refus à 4,0 m ($RP = 640$).

— **PDL2** affiche une progression beaucoup plus homogène et régulière des résistances, trouvant un niveau d'assise similaire avec un refus validé à 4,8 m ($RP = 640$).

— **PDL3** se distingue par une augmentation critique et très précoce de la compacité dès la surface, aboutissant à un refus brutal et superficiel à seulement 1,4 m de profondeur ($RP = 790$).

— **PDL4** traverse une très forte épaisseur de sédiments meubles et mous en surface (résistances inférieures à 117 jusqu'à 4,0 m), n'amorçant une amélioration mécanique tardive qu'au-delà de 5,6 m pour valider un refus profond à 6,8 m ($RP = 570$).

Ces essais mettent en évidence un pendage marqué du toit du substratum résistant, plongeant de la zone du PDL3 (1,4 m) vers le PDL1 (4,0 m), le PDL2 (4,8 m) et atteignant son niveau le plus bas au droit du PDL4 (6,8 m). En raison des risques importants de tassements différentiels induits par cette configuration asymétrique et par la présence de couches molles en surface au niveau du PDL4, des fondations superficielles directes ne sont pas recommandées sur l'ensemble de l'emprise. Le choix de fondations profondes (pieux ou micropieux) ancrés uniformément dans la formation compacte sous les niveaux de refus constitue la solution technique la plus sûre pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

Essais pressiométriques

Principe : C'est un essai de chargement direct réalisé sur site. On introduit une sonde cylindrique dilatable dans un forage. On mesure la variation de volume en fonction de la pression appliquée, ce qui permet de déterminer le Module pressiométrique (E) et la Pression limite de rupture (P_l).

Le tableau VI.6 expose les caractéristiques obtenues lors des campagnes.

TABLE 6.6 – Caractéristiques pressiométriques par sondage

Sondage	E **(bars)**	P_l **(bars)**	E/P_l	**État de Consolidation**	**Cat. RPA**
SP-01	97.01 - 385.7	19.54 - 47.6	4.96 - 8.10	Normalement consolidé	S2
SP-02	169.2 - 882.5	18.50 - 42.68	4.82 - 47.7	Normalement consolidé	S2
SP-03	89.10 - 713.7	14.30 - 48.62	5.22 - 9.26	Normalement consolidé	S2
SP-04	164.4 - 454.4	24.19 - 48.50	4.85 - 9.51	Normalement consolidé	S2
SP-05	213.4 - 600.8	18.30 - 47.60	5.60 - 19.76	Normalement consolidé	S2
SP-06	108.4 - 1348.7	16.20 - 47.67	6.69 - 28.29	Normalement consolidé	S2

Synthèse : Les résultats indiquent des plages de modules pressiométriques (E) très étendues, traduisant le passage d'horizons meubles superficiels à des horizons très rigides ou cimentés en profondeur. Le ratio E/P_l confirme un comportement de sols normalement consolidés. La classification homogène en catégorie S2 selon le RPA implique un sol ferme à moyennement rigide face aux sollicitations dynamiques.

Pour éclairer ces données mécaniques, la nature lithologique associée à ces forages est résumée dans le tableau VI.8.

TABLE 6.8 – Coupe géologique des forages pressiométriques

Prof. (m)	SP 01 & 02	SP 03	SP 04 & 05	SP 06
0.00 – 4.00	Remblai hétérogène	Argile, limons, sables et graves	Sable grossier et graves	Argile limoneuse et graves
4.00 – 10.00	Alluvions cimentés (argiles)	-	Alluvions cimentés	Sable grossier et graves

Synthèse : La coupe croisée des forages met en évidence une couverture de remblais ou de sols fins alluvionnaires (argiles et limons) sur les quatre premiers mètres. Au-delà, on note l'apparition systématique de formations plus compétentes (alluvions cimentés ou graves compactes), ce qui explique la nette augmentation des caractéristiques pressiométriques observée en profondeur.

6.3.2 Essais de laboratoire

Essais physiques

Les propriétés d'état des échantillons intacts prélevés au carottier sont regroupées dans le tableau VI.10.

TABLE 6.10 – Propriétés d'état

Sondage	Prof. (m)	W (%)	γ_h (t/m^3)	γ_d (t/m^3)	S_r (%)	Observations
F01	1.0 - 1.5	12.2	2.10	1.80	75	Sol non saturé et dense
	9.5 - 9.8	-	-	2.61	-	Roche
	13.5 - 13.9	-	-	-	-	Roche
F02	6.4 - 6.9	14.5	2.06	1.80	78	Sol non saturé et dense
F03	3.0 - 4.0	-	-	-	-	Roche
	12.6 - 18.0	-	-	-	-	Roche
	18.0 - 18.5	14.4	2.08	1.81	79	Sol non saturé et très dense
F04	2.0 - 3.0	29.9	2.13	1.64	100	Sol saturé et dense
F05	2.0 - 2.3	6.2	2.02	1.90	40	Sol non saturé et très dense
F06	6.2 - 6.5	31.5	2.04	1.50	100	Sol saturé et peu dense

Synthèse : Les mesures physiques permettent de différencier clairement les horizons meubles des horizons rocheux (γ_d atteignant 2,61 t/m^3). Les horizons fins de surface sont généralement denses et non saturés, excepté pour F04 et F06 qui sont totalement saturés ($S_r = 100\%$), présentant pour ce dernier une faible densité ($\gamma_d = 1,50$ t/m^3) requérant une vigilance accrue.

Pour affiner l'identification des sols fins, les limites d'Atterberg ont été déterminées (Tableau VI.12).

TABLE 6.12 – Limites d'Atterberg (Norme NF P 94-051)

Sondage	Prof. (m)	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)	I_C	Interprétation
F01	1.0 - 1.5	30	14	16	1.27	Argile peu plastique dure
F02	6.4 - 6.9	24	12	12	0.79	Argile peu plastique très ferme
F03	18.0 - 18.5	70	30	40	1.85	Argile très plastique dure
F04	2.0 - 3.0	36	18	18	0.34	Argile peu plastique molle
F05	2.0 - 2.3	36	20	16	1.49	Argile peu plastique dure
F06	6.2 - 6.5	39	20	19	0.38	Argile peu plastique molle

Synthèse : La majorité des sols testés se classent comme des argiles peu plastiques. L'exception notable provient du sondage profond F03 (18 m) qui intercepte une argile très plastique ($I_P = 40\%$) à consistance dure ($I_C = 1,85$), signalant la présence d'un horizon au comportement potentiellement gonflant. Les indices de consistance faibles de F04 et F06 ($I_C < 0,4$) confirment leur état mol et leur faible portance naturelle.

L'analyse granulométrique des échantillons vient compléter cette classification physique dans le tableau VI.14.

TABLE 6.14 – Résultats de l'analyse granulométrique (Norme NF P 94-057)

Sondage	Prof. (m)	% < 2 mm	% < 80 μm	Classification LCPC
F01	1.0 - 1.5	30.80	7.70	Sol grenu
	12.0 - 13.0	30.80	47.70	Sol grenu
F02	6.4 - 6.9	94.40	67.60	Sol fin
	10.5 - 20.0	49.20	8.90	Sol grenu
F04	2.0 - 3.0	50.90	30.15	Sol grenu
F05	2.0 - 2.3	89.52	52.86	Sol fin
F06	6.2 - 6.5	70.12	39.30	Sol grenu

Synthèse : La distribution des tailles de particules confirme la nature mixte du tracé. On note l'alternance de « sols fins » (passant à 80 μm supérieur à 50% pour F02 et F05) et de « sols grenus » à forte matrice sableuse ou graveleuse (F01, F04, F06), justifiant la variabilité des propriétés mécaniques.

Essais mécaniques

Les caractéristiques de résistance au cisaillement (cohésion et angle de frottement interne) obtenues à la boîte de Casagrande et au triaxial sont projetées dans le tableau VI.16.

TABLE 6.16 – Caractéristiques de cisaillement (Boîte de Casagrande NF P 94-071-2 et Triaxial NF P 94-074)

Sondage	Prof. (m)	Casagrande (CD)		Triaxial (UU)	
		C' (kPa)	ϕ' (°)	C_{uu} (kPa)	ϕ_{uu} (°)
F01	1,0 - 1,5	-	-	1,34	28
F02	6,4 - 6,9	-	-	1,43	31
F03	18,0 - 18,5	0,11	24	-	-
F04	5,0 - 5,5	0,38	19	-	-
F05	2,0 - 2,3	-	-	0	25

Synthèse : Les essais de cisaillement montrent des frottements internes appréciables (ϕ variant de 19 à 31°) caractéristiques des fractions sableuses et des sols peu plastiques. Les valeurs de cohésion obtenues en conditions drainées (CD) restent modérées, validant la sensibilité de ces sols à la rupture en cas de saturation ou de modification des contraintes de confinement. *(Note : les horizons graveleux n'ont pas permis la confection d'éprouvettes CD).*

Les éprouvettes prélevées au sein de la matrice rocheuse compacte ont fait l'objet d'essais d'écrasement (Tableau VI.18).

TABLE 6.18 – Essais de compression simple sur roche (Norme NF P 94-077)

Sondage	Profondeur (m)	Résistance (RCS) en bars
F01	9.5 - 9.8	190
	13.5 - 13.9	142
F03	3.0 - 4.0	393
	12.6 - 18.0	361

Synthèse : Les résultats de compression uniaxiale (RCS) mettent en évidence un substratum rocheux de bonne résistance mécanique, s'élevant jusqu'à 393 bars pour le sondage F03. Ces valeurs confirment que ces horizons constituent une excellente assise rigide pour l'ancrage des fondations profondes des futurs ouvrages.

Les paramètres de déformabilité et de consolidation sous charges verticales ont été extraits des essais œdométriques (Tableau VI.20).

TABLE 6.20 – Essais œdométriques (Norme NF P 94-090-1)

Sondage	Prof. (m)	P_c (bar)	C_c (%)	C_g (%)	Interprétation
F03	18,0 - 18,5	0,965	0,242	0,110	Sol compressible et peu gonflant
F04	2,0 - 3,0	0,385	0,137	0,040	Sol peu compressible, peu gonflant
	5,0 - 5,5	0,235	0,114	0,049	Sol peu compressible, peu gonflant

Synthèse : L'analyse œdométrique qualifie l'argile profonde de F03 comme compressible ($C_c = 0,242$) mais dotée d'un potentiel de gonflement limité ($C_g = 0,110$). Les niveaux superficiels (F04) montrent une

compressibilité plus faible, ce qui limite les risques de tassements différés de forte amplitude sous les surcharges de remblai ordinaires.

Analyses chimiques

L'évaluation de l'agressivité des sols vis-à-vis des composants structuraux en béton ou en acier a été menée par le biais d'analyses chimiques (Tableau VI.22).

TABLE 6.22 – Analyses chimiques (Normes NF P 94-048 & 94-055)

Sondage	Prof. (m)	Chlorures %	Carbonates %	Sulfates	M.O. (%)
F01	1.0 - 1.5	0	46.11	Traces	-
F02	6.4 - 6.9	0.06	24.76	Traces	2.81
F03	3.0 - 4.0	0	-	Traces	-
F05	27.5 - 28.0	0	38.33	Traces	1.90
F06	6.2 - 6.5	0	23.83	Traces	3.60

Synthèse : Les données chimiques révèlent des teneurs nulles à très faibles en chlorures et l'absence substantielle de sulfates (présents sous forme de traces). Associé à un taux de matières organiques (M.O.) faible à modéré, l'ensemble des couches inspectées est qualifié de sol non organique et non agressif, sécurisant le choix des bétons standards.

6.4 Classification synthétique et Conclusion

Afin d'offrir une vision claire et exploitable pour le dimensionnement de la plateforme ferroviaire et la conception des terrassements, la dernière section fusionne les différentes données d'identification.

Le tableau VI.24 synthétise de manière croisée la sectorisation du tracé par rapport aux classifications GTR (Guide des Terrassements Routiers) et UIC (Union Internationale des Chemins de Fer).

TABLE 6.24 – Tableau de synthèse finale : Classification GTR et UIC du tracé

Secteur / Intervalle	Unité lithologique prédominante	Classement GTR	Classement UIC
PK 54+000 – PK 56+000	Unité 1 – Alluvions de terrasses (Galets, sables, limons bas)	**B4 / B5** (Sols grenus à matrice fine)	**QS1 à QS2** (Portance moyenne à correcte)
PK 56+000 – PK 60+000	Unité 2 – Formations altérées et limoneuses de transition	**A2** (Argiles et limons moyennement plastiques)	**QS1** (Médiocre, nécessite un traitement)
PK 60+000 – PK 64+850	Unité 3 – Argile grise compacte numidienne (AGC)	**A3 / A4** (Argiles très plastiques à comportement gonflant)	**QS1** (Médiocre, portance faible à très faible)

Synthèse : Ce tableau récapitulatif met en évidence une dégradation claire des aptitudes géotechniques de la plateforme ferroviaire d'Ouest en Est. Le premier secteur alluvial offre une portance acceptable (QS2), tandis que la transition vers la chaîne numidienne introduit des sols fins hautement plastiques et compressibles (A3/A4) classés QS1. Ces zones exigeront des dispositions constructives particulières lors des travaux de terrassement (substitution, purge ou traitement aux liants hydrauliques).

6.4.1 Conclusion générale

Les analyses chimiques réalisées confirment le caractère non organique et non agressif de l'ensemble des sols rencontrés vis-à-vis des structures en béton et en acier, ce qui simplifie le choix des matériaux de construction. Du point de vue sismique, la wilaya de Guelma est classée en zone de sismicité moyenne (Zone IIa selon le RPA 99/2003), ce qui impose la prise en compte des effets sismiques dans les calculs de stabilité des ouvrages.

En conclusion, les données recueillies et analysées dans ce chapitre fournissent une base technique solide pour la conception des terrassements, le dimensionnement des fondations et le choix des solutions constructives adaptées aux conditions géotechniques rencontrées. Il est notamment recommandé d'opter pour des fondations profondes ancrées dans le substratum gréseux pour les ouvrages d'art, et d'assurer un contrôle rigoureux des conditions de compactage des remblais sur les zones de sols fins compressibles.

Chapitre VII

Terrassements et ouvrages d'art

Introduction

Ce chapitre traite les travaux de terrassement et les ouvrages d'art nécessaires au franchissement des obstacles le long du projet, et établit la liaison entre ces deux composantes par une structuration en sections homogènes, assurant ainsi la cohérence technique sur l'ensemble du linéaire.

7.1 Travaux de terrassement

7.1.1 Synthèse des zones de remblai (H $\geq$ 8 m)

TABLE 7.1 – Zones de remblai de hauteur $\geq$ 8 m – PK 54+000 – PK 64+000

PK début	PK fin	H_{max} (m)	Pente proposée	Sondages	FS statique	FS sismique
54+125	54+750	17,94	2H/1V	SP01, SP02	1,92 $>$ 1,5	1,61 $>$ 1,0
63+125	63+525	11,22	2H/1V	SP06	1,95 $>$ 1,5	1,63 $>$ 1,0

Toutes les zones de remblai de la fenêtre étudiée présentent, avec une berme de 2 m tous les 6 m de hauteur (pente 2H/1V au-delà de 8 m), des coefficients de sécurité supérieurs aux seuils requis (1,5 en conditions statiques et 1,0 en conditions sismiques) : elles sont donc **stables** sans renforcement particulier.

7.1.2 Synthèse des zones de déblai (H $\geq$ 8 m)

TABLE 7.2 – Zones de déblai de hauteur $\geq$ 8 m – PK 54+000 – PK 64+000

PK début	PK fin	H_{max} (m)	Sondages	Nature dominante	Classe GTR	Classe UIC	FS stat.	FS sism.
55+075	55+825	23,23	F02, SP02	Grès / argile limoneuse / alluvion	R43-A2-B6	QS2-QS1	1,52 > 1,5	1,28 > 1,0
57+200	57+500	26,01	F03, SP03	Argile limoneuse graveleuse / argile grise	A2-A3	QS1	1,48 < 1,5	1,22 > 1,0
58+150	58+725	22,41	F03, SP03	Alluvion / argile limoneuse / argile grise	B6-A2-A3	QS1	1,38 < 1,5	1,15 > 1,0
59+300	59+500	12,50	SP04	Argile limoneuse graveleuse	A2	QS1	1,85 > 1,5	1,55 > 1,0
59+700	59+975	15,59	SP04	Argile limoneuse graveleuse	A2	QS1	1,78 > 1,5	1,48 > 1,0
60+850	61+550	16,08	SP05	Argile limoneuse graveleuse	A2	QS1	1,72 > 1,5	1,44 > 1,0
61+950	62+200	12,50	SP05	Argile limoneuse graveleuse	A2	QS1	1,88 > 1,5	1,57 > 1,0

7.1.3 Bilan de stabilité et zones nécessitant un renforcement

L'analyse des résultats des tableaux VII.1 et VII.2 permet de dégager les conclusions suivantes pour la fenêtre PK 54+000 – PK 64+000 :

— **Remblais** : aucune zone instable – l'ensemble des zones de remblai recensées respecte les coefficients de sécurité requis avec une pente 2H/1V et une berme de 2 m tous les 6 m.

— **Déblais** : deux zones sont **instables** en l'état et nécessitent un renforcement :

  — **PK 57+200 – PK 57+500** (H_{max} = 26,01 m, FS statique = 1,48) ;

  — **PK 58+150 – PK 58+725** (H_{max} = 22,41 m, FS statique = 1,38).

  Les autres zones de déblai sont stables avec la pente 2H/1V et la berme standard.

7.1.4 Approvisionnement en matériaux et réutilisation des déblais

Gîtes d'emprunt

Aucun gîte d'emprunt n'est implanté à l'intérieur de la fenêtre PK 54+000 – PK 64+000. Le gîte le plus proche est **ZE01 (PK 69+900)**, situé à 200 m du tracé, constitué de grès classé **R43**, susceptible d'alimenter les remblais courants et la couche de forme de la section après caractérisation complémentaire.

Carrières

Pour les matériaux de ballast, sous-ballast, couche de fondation et couche de forme, la carrière la plus proche identifiée dans la zone **« Deux Martyrs SARL » (Bouchegouf)**, exploitant du calcaire utilisable pour l'ensemble de ces usages.

Réutilisation des matériaux de déblai

Les matériaux extraits des déblais sont classés en catégorie **QS1**. Ces matériaux sont réutilisables en remblai sous réserve du respect des conditions de teneur en eau définissant le mode de mise en œuvre et de compactage.

Traitement des matériaux QS1 Les sols de classe QS1 (sables et limons peu argileux, VBS $< 0{,}1$, IP < 12) peuvent être améliorés par différents traitements afin d'être valorisés en remblai ou en couche de forme. Les traitements possibles pour cette classe de sol sont les suivants :

— **Traitement à la chaux** : amélioration de la portance immédiate, réduction de la teneur en eau et de la plasticité. La chaux provoque une floculation des particules argileuses, améliorant ainsi la maniabilité et le compactage. Dosage typique : 2 à 4%.

— **Traitement au ciment** : stabilisation mécanique avec développement d'une résistance à long terme. Le ciment confère au sol traité un comportement de type matériau semi-rigide. Dosage typique : 3 à 6%.

— **Traitement mixte chaux + ciment** : combinaison des effets de séchage de la chaux et de la prise du ciment. Ce double traitement permet d'obtenir une stabilisation complète avec une résistance à long terme élevée. Dosage typique : 2% chaux + 5% ciment.

Le choix du traitement dépendra des objectifs de portance requis, des conditions de teneur en eau sur chantier et des contraintes de délai. Une étude de formulation préalable sera nécessaire pour définir le dosage optimal et vérifier l'aptitude du sol au traitement selon la norme NF P 94-100.

7.2 Ouvrage d'art

7.2.1 Définition et rôle des ouvrages d'art ferroviaires

Dans le cadre des infrastructures ferroviaires, un ouvrage d'art désigne toute construction de génie civil permettant de franchir un obstacle naturel ou artificiel — vallée, cours d'eau, voie de communication, zone bâtie — afin d'assurer la continuité et la régularité de l'exploitation ferroviaire. Ces ouvrages constituent des éléments critiques de la ligne, soumis à des charges dynamiques importantes liées au passage des trains, et doivent répondre à des exigences strictes en matière de résistance, de déformabilité et de durabilité.

7.2.2 Classification des ouvrages d'art

Les ouvrages d'art peuvent être classifiés selon plusieurs critères :

Selon leur système statique

— **Ponts à poutres** : structure portante constituée de poutres droites (en béton précontraint ou en acier) reposant sur des appuis ; système le plus répandu pour des portées faibles à moyennes ;

— **Viaducs mixtes acier–béton** : le tablier associe des poutres métalliques en acier à une dalle en béton coulée sur place, bénéficiant ainsi de la résistance à la compression du béton et de la résistance à la traction de l'acier ;

— **Ponts en arc** : la charge est transmise par compression le long d'un arc courbe jusqu'aux naissances ; adaptés aux grandes portées et aux vallées profondes ;

— **Ponts à haubans** : le tablier est suspendu par des câbles obliques ancrés à un ou plusieurs pylônes ;

— **Ponts suspendus** : le tablier est supporté par des câbles porteurs horizontaux tendus entre pylônes ;

— **Ponts à béquilles (cadres)** : structure monolithique rigide réunissant tablier, piles et fondations en un ensemble indéformable.

Selon le matériau de construction

— Ouvrages en **béton armé** (BA) : pour de petites portées ;

— Ouvrages en **béton précontraint** (BP) : pour des portées moyennes, avec maîtrise de la fissuration et des déformations ;

— Ouvrages **métalliques** (acier) : légèreté et rapidité de montage ;
— Ouvrages **mixtes** acier–béton : combinaison optimale des deux matériaux.

7.2.3 Composants principaux d'un ouvrage d'art

Un ouvrage d'art ferroviaire est composé de plusieurs éléments structuraux fondamentaux :

0. **Le tablier** : partie horizontale supportant la voie ferrée. Il comprend la dalle de roulement (ou le ballast), les poutres principales et les entretoises.
0. **Les appuis** :
   — *Culées* : appuis en extrémité, assurant le raccordement avec les remblais d'accès et reprenant les poussées longitudinales ;
   — *Piles* : appuis intermédiaires fondés en sol ou dans le lit d'un cours d'eau, dont la hauteur conditionne le gabarit de l'ouvrage.
0. **Les fondations** : superficielles (semelles, radiers) ou profondes (pieux, barrettes), selon la nature du sol.
0. **Les appareils d'appui** : dispositifs (en élastomère fretté ou en acier) permettant la transmission des charges entre tablier et appuis tout en autorisant les déformations thermiques et les rotations.
0. **Les joints de dilatation** : assurent la continuité du rail et de la structure malgré les variations dimensionnelles dues à la température.
0. **Les équipements** : garde-corps, corniches, dispositifs d'évacuation des eaux, câbles de signalisation, trottoirs d'inspection, etc.

7.2.4 Principes de conception

Données préliminaires

La conception d'un ouvrage d'art ferroviaire débute par la collecte des données du site :

— Topographie et géotechnique du sol (sondages, essais SPT, CPT) ;
— Hydrologie et hydraulique (débit de crue, cote de la ligne d'eau libre) ;
— Nature et intensité du trafic ferroviaire (type de convoi, vitesse de référence, gabarit) ;
— Contraintes géométriques de la ligne (rayon de courbure, dévers, rampe) ;
— Contraintes environnementales et réglementaires.

Choix du type d'ouvrage

Le choix du système structurel dépend essentiellement de :

— La portée totale L et les portées partielles l_i ;
— La hauteur constructive disponible sous le tablier ;
— Les conditions de fondation ;
— Le délai d'exécution et le coût global.

À titre indicatif, les portées économiques courantes sont :

Type d'ouvrage	Portée courante
Pont à poutres BA	5 – 30 m
Pont à poutres BP	20 – 60 m
Viaduc mixte acier–béton	40 – 150 m
Pont en arc	50 – 300 m
Pont à haubans	100 – 1 000 m
Pont suspendu	200 – 2 000 m

TABLE 7.3 – Portées caractéristiques selon le type d'ouvrage d'art

7.2.5 Présentation des ouvrages d'art du projet

Le présent projet comporte cinq ouvrages d'art répartis le long du tracé de la ligne ferroviaire, classés en deux familles structurelles : deux ponts à poutres en béton précontraint et trois viaducs mixtes acier–béton.

OA 1 — Pont à poutres BP sur la RN 16

Définition et description. Un **pont à poutres en béton précontraint (BP)** est un ouvrage dont la structure portante est constituée de poutres en béton dans lesquelles une mise en tension préalable des armatures (câbles ou torons) est introduite avant ou après le coulage du béton. Cette précontrainte comprime la fibre inférieure de la poutre, compense les tractions dues aux charges et permet de franchir des portées plus importantes que le béton armé simple, avec une hauteur de poutre réduite et une meilleure maîtrise de la fissuration.

L'ouvrage OA 1 franchit la **Route Nationale RN 16**, assurant ainsi le rétablissement de la circulation routière existante sous le tracé de la ligne ferroviaire. Le tablier est constitué de poutres précontraintes disposées dans le sens longitudinal, reposant sur deux culées en béton armé. L'absence de piles intermédiaires confère à cet ouvrage une travée unique, simple à réaliser et à entretenir.

OA 2 — Pont à poutres BP sur route locale

Définition et description. De conception structurelle identique à l'OA 1, l'**ouvrage OA 2** est un pont à poutres en béton précontraint destiné à franchir une **route locale**. La précontrainte est assurée par des câbles intérieurs gainés et injectés (précontrainte par post-tension), garantissant une résistance élevée aux efforts de flexion et une grande durabilité face aux agents agressifs du milieu environnant. Les dimensions du tablier et des culées sont adaptées aux charges de trafic secondaire et aux contraintes géométriques locales imposées par le tracé en plan et le profil en long de la ligne.

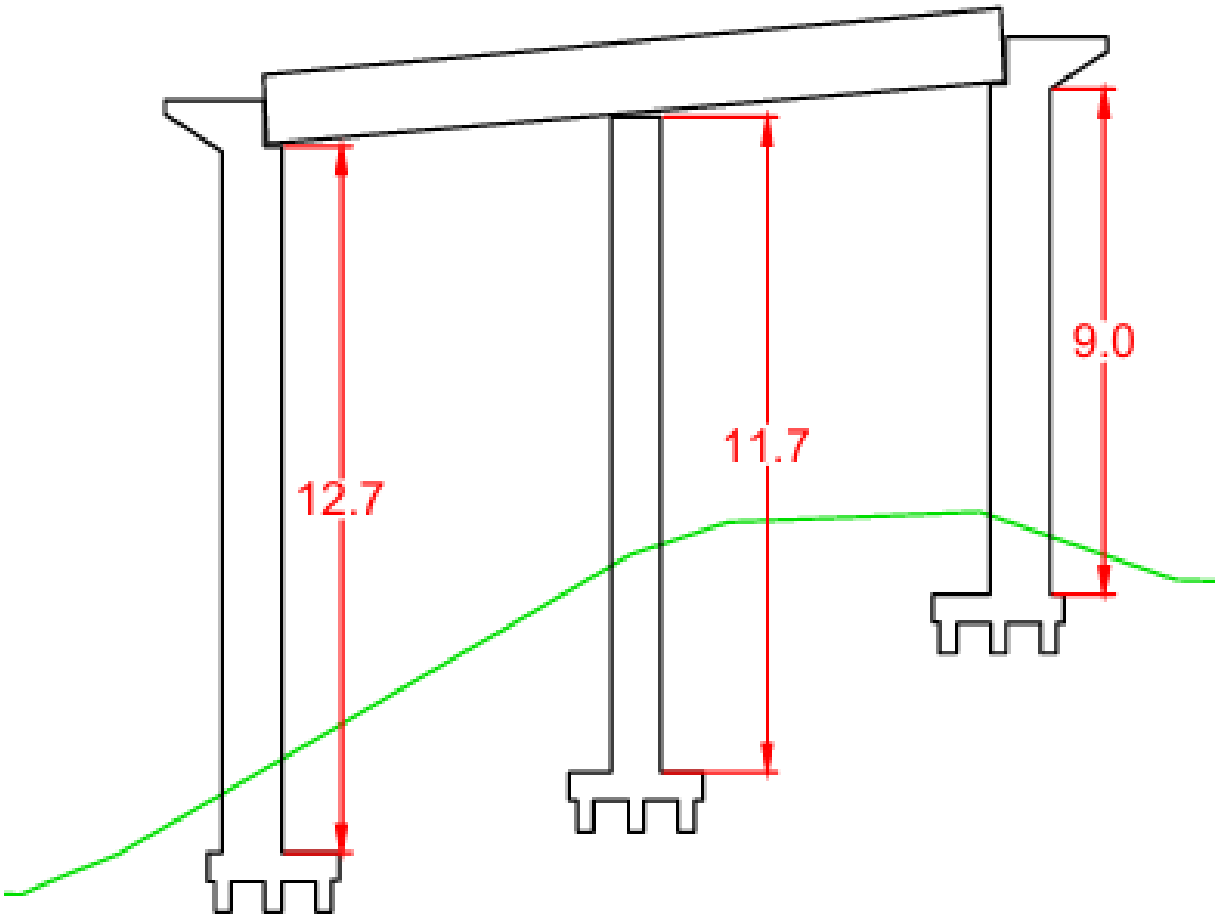
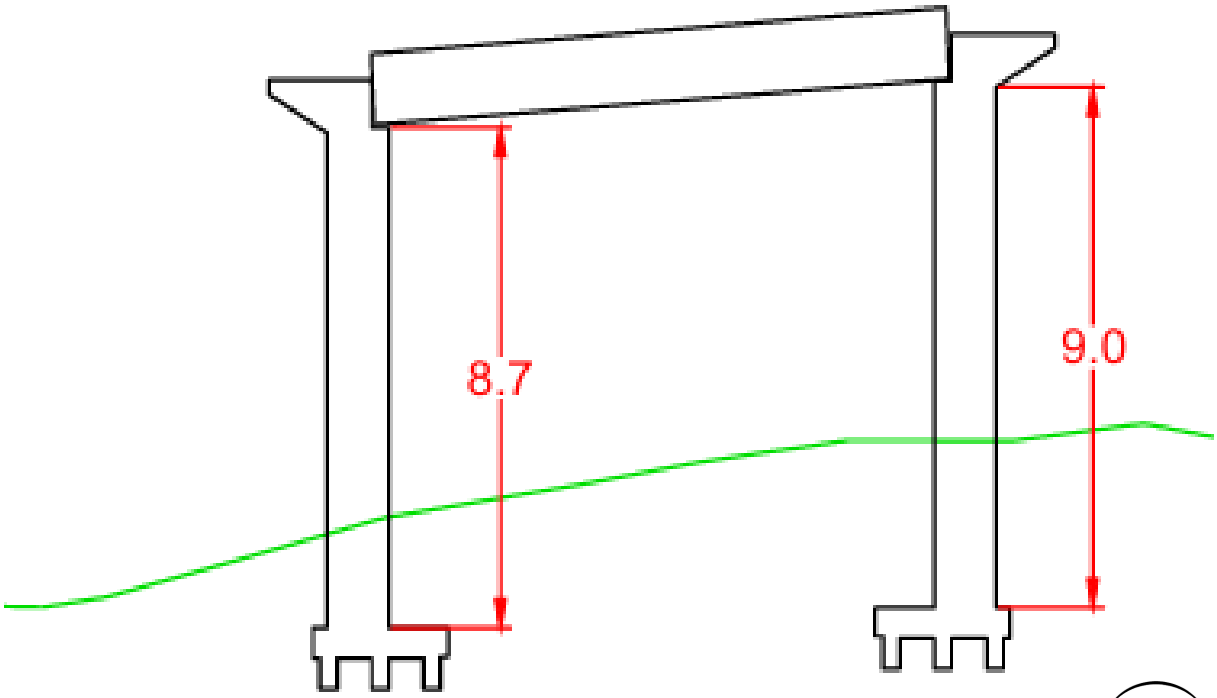


FIGURE 7.1 – Profil en long – OA 1 : Pont BP sur la RN 16



OA 3 — Viaduc mixte acier–béton

Définition et description. Un **viaduc mixte acier–béton** est un ouvrage à plusieurs travées dont le tablier résulte de l'association de **poutres métalliques en acier** (type IPE, HEM ou caissons) et d'une **dalle en béton armé** coulée sur place. La connexion entre les deux matériaux est assurée par des connecteurs (goujons soudés), rendant l'ensemble solidaire et permettant une répartition optimale des efforts : la dalle en béton reprend la compression et les poutres métalliques reprennent la traction. Les **piles** et les **culées** sont entièrement réalisées en béton armé.

L'ouvrage OA 3 constitue le premier viaduc mixte de la ligne. Sa hauteur de piles et l'emprise de son franchissement ont conduit au choix de cette solution mixte, particulièrement adaptée aux contraintes topographiques du site.

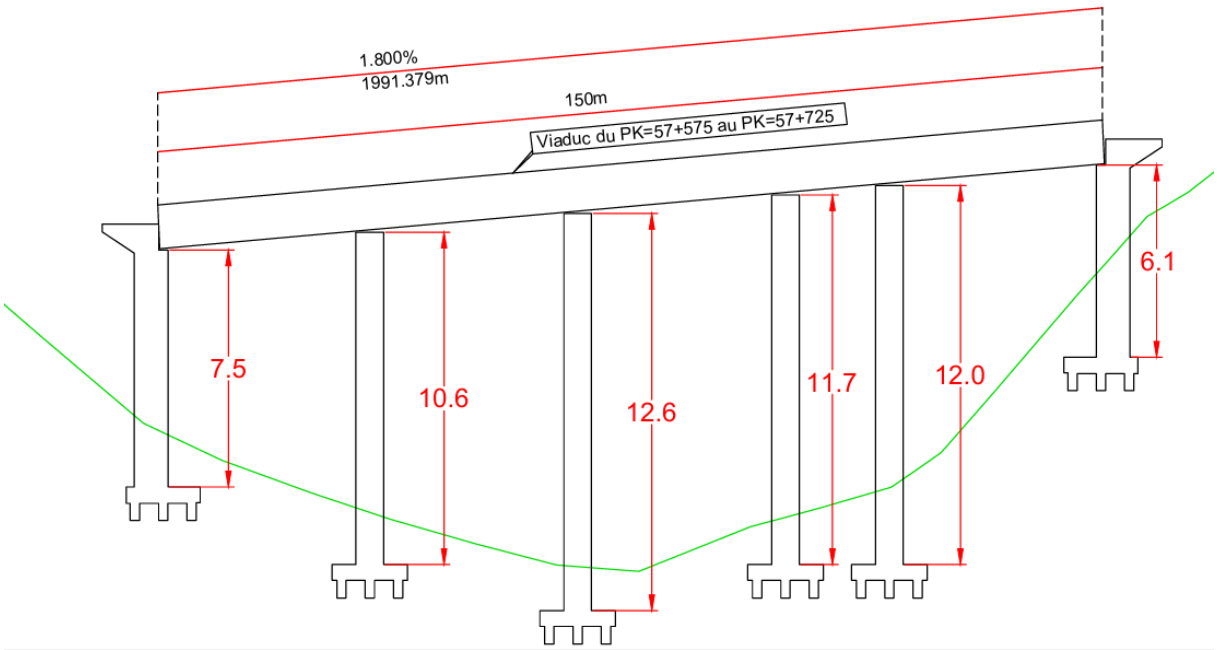


FIGURE 7.3 – Profil en long – OA 3 : Viaduc mixte acier–béton

OA 4 — Viaduc mixte acier–béton

Définition et description. L'ouvrage OA 4 est un **viaduc mixte acier–béton** partageant le même principe structurel que l'OA 3. Il se distingue par ses caractéristiques géométriques propres — portées des travées, hauteurs des piles et configuration des culées — dictées par la topographie et la géologie spécifiques de son site d'implantation. La dalle mixte assure la continuité transversale du tablier et participe à la rigidité globale de l'ouvrage, limitant ainsi les déformations sous les charges ferroviaires dynamiques.

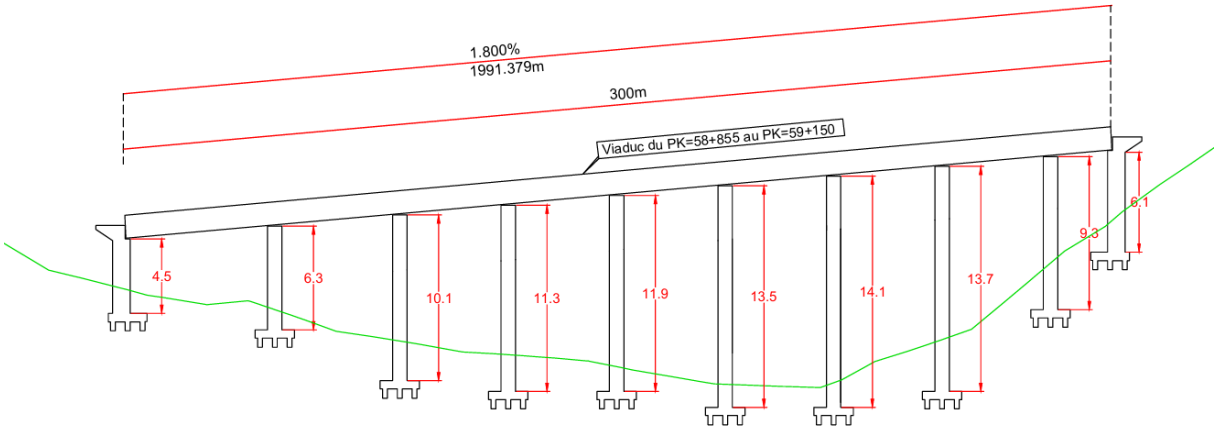


FIGURE 7.4 – Profil en long – OA 4 : Viaduc mixte acier–béton

OA 5 — Viaduc mixte acier–béton

Définition et description. L'ouvrage OA 5 est le troisième et dernier **viaduc mixte acier–béton** du projet. Sa conception reprend les mêmes principes structurels que les ouvrages OA 3 et OA 4, avec un tablier composé de poutres métalliques en acier solidarisées à une dalle en béton armé par connecteurs, et des appuis (piles et culées) en béton armé. Les spécificités géométriques de cet ouvrage — notamment les hauteurs de piles et les portées de travées — sont déterminées par les conditions de terrain et les exigences du gabarit ferroviaire à maintenir.

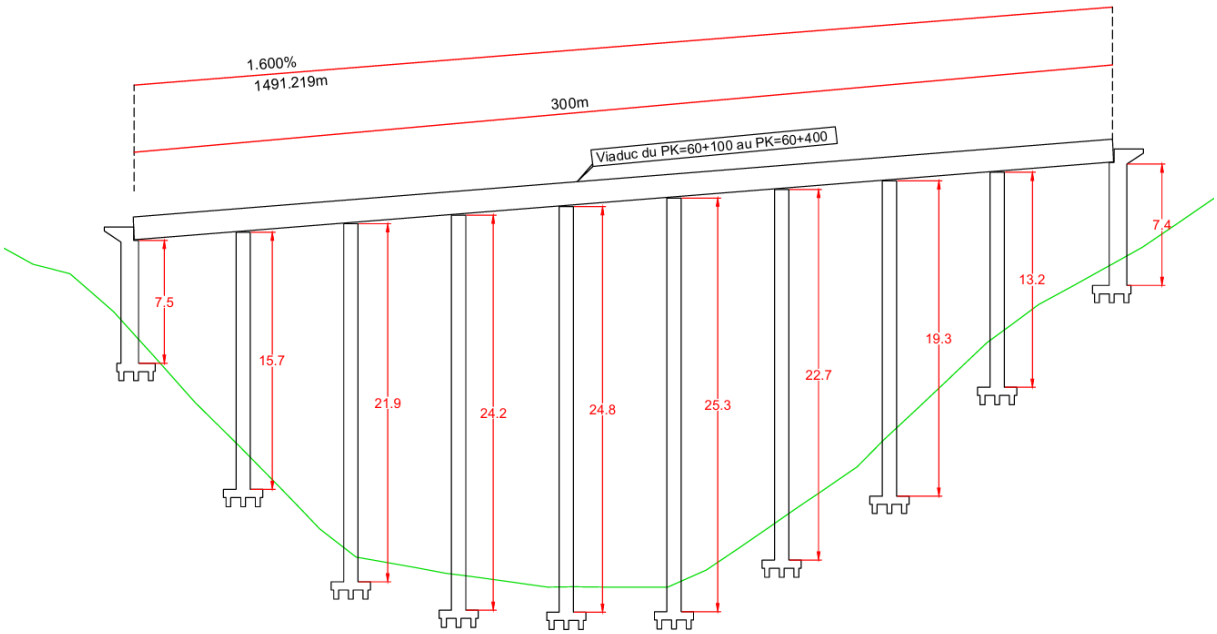


FIGURE 7.5 – Profil en long – OA 5 : Viaduc mixte acier–béton

Profil en long.

7.2.6 Tableau récapitulatif des ouvrages d'art

Le tableau VII.4 récapitule les cinq ouvrages d'art du projet, classés par point kilométrique (PK) croissant, avec les hauteurs caractéristiques des culées et des piles.

N°	Désignation	PK	H. Culée 1 (m)	H. Culée 2 (m)	H. pile max. (m)
OA 1	Pont BP / RN 16	54+337 au 54+403	12,7	9	11,7
OA 2	Pont BP / Route locale	546+487 au 56+538	8,7	9	—
OA 3	Viaduc mixte acier–béton	57+575 au 57+725	7,5	6,1	12,6
OA 4	Viaduc mixte acier–béton	58+850 au 59+150	4,5	6,1	14,1
OA 5	Viaduc mixte acier–béton	60+100 au 60+400	7,5	7,4	25,3

TABLE 7.4 – Tableau récapitulatif des ouvrages d'art – caractéristiques géométriques des appuis

Note : Les cellules "—" des ponts BP (OA 1 et OA 2) indiquent l'absence de piles intermédiaires pour ces ouvrages à travée unique. Les valeurs de PK et de hauteurs sont à compléter conformément aux plans d'exécution.

7.2.7 Bases du dimensionnement

Charges et actions

Le dimensionnement des ouvrages est réalisé conformément aux Eurocodes et aux normes ferroviaires applicables (EN 1991-2 pour les charges de trafic ferroviaire). Les actions sont classées en :

- **Actions permanentes** (G) : poids propre des éléments structuraux et non structuraux, poussée des terres, précontrainte ;
- **Actions variables** (Q) :
  - Charges de trafic ferroviaire : convoi LM 71 (charge linéique $q_k = 80$ kN/m, charge ponctuelle $Q_k = 250$ kN) et convoi SW/0 pour lignes à trafic lourd ;
  - Vent, neige, variations thermiques, forces de freinage et d'accélération ;
  - Forces centrifuges (ouvrage en courbe) ;
- **Actions accidentelles** (A_d) : déraillement, séisme, choc.

Combinaisons de charges

Les vérifications sont conduites aux états limites selon les combinaisons réglementaires suivantes :

État Limite Ultime (ELU) — Situation de dimensionnement persistante :

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j}\, G_{k,j} \;+\; \gamma_P\, P \;+\; \gamma_{Q,1}\, Q_{k,1} \;+\; \sum_{i>1} \gamma_{Q,i}\, \psi_{0,i}\, Q_{k,i} \tag{VII.1}$$

État Limite de Service (ELS) — Combinaison caractéristique :

$$E_d = \sum_{j\geq 1} G_{k,j} \; + \; P \; + \; Q_{k,1} \; + \; \sum_{i>1} \psi_{0,i}\, Q_{k,i} \tag{VII.2}$$

où γ_G, γ_Q sont les coefficients partiels de sécurité et ψ_0 les coefficients de combinaison définis par l'EN 1990.

Vérifications structurales

Les vérifications portent principalement sur :

0. **La résistance en flexion** du tablier :

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \tag{VII.3}$$

0. **La résistance à l'effort tranchant** :

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \tag{VII.4}$$

0. **La déformation (flèche)** en service :

$$f \leq f_{\text{adm}} = \frac{L}{600} \quad \text{(pont ferroviaire, EN 1990 – Annexe A2)} \tag{VII.5}$$

0. **La fissuration** (limitation de l'ouverture de fissure $w_k \leq 0{,}3$ mm en milieu XC3/XC4) ;
0. **La stabilité au déversement** pour les poutres métalliques des viaducs mixtes ;
0. **La fatigue** sous trafic cyclique ferroviaire (EN 1993-2, EN 1994-2).

Dimensionnement des fondations

La capacité portante d'une fondation sur pieux est évaluée selon :

$$R_{c,d} = \frac{R_{b,k} + R_{s,k}}{\gamma_t} \tag{VII.6}$$

où $R_{b,k}$ est la résistance de pointe caractéristique, $R_{s,k}$ la résistance de frottement latéral et γ_t le coefficient de modèle selon l'EN 1997.

Chapitre VIII

Assise Ferroviaire

Introduction

L'infrastructure de la voie ferrée est la partie sur laquelle repose cette voie, elle sert à repartir sur la plateforme les charges exercées par les traverses et amortir les vibrations de la superstructure. De plus, les couches d'assises contribuent à assurer, par leur nature et leur épaisseur, le bon comportement de la voie ferrée du point de vue rigidité, tenue du nivellement et drainage. Elles comprennent la couche de ballast, la couche sous-ballast, la couche de fondation et une couche anti-contaminant si nécessaire, ainsi qu'une couche drainante.

Pour assurer la durabilité et la performance du tronçon ferroviaire **Bouchegouf – Souk Ahras**, section du **PK 54+000 au PK 64+000**, il est indispensable d'étudier et de dimensionner correctement la structure d'assise ferroviaire. Celle-ci constitue l'ensemble des couches situées entre les rails et la plateforme naturelle, garantissant la transmission des charges du trafic ferroviaire vers le sol support. Ce chapitre présente, en s'appuyant sur les résultats de la campagne géotechnique réalisée sur ce tronçon, les différentes couches constituant l'assise ferroviaire, leur dimensionnement selon la fiche **UIC 719R**, et les caractéristiques des matériaux à mettre en œuvre.

8.1 Différentes couches d'assise

La couche d'assise ferroviaire est essentielle pour distribuer les charges des trains de manière uniforme, assurant ainsi la stabilité de la voie. Elle minimise les déformations, favorise le drainage et maintient le nivellement, contribuant ainsi à la sécurité et à la durabilité de l'infrastructure ferroviaire.

Les couches d'assise contribuent à assurer, par leur nature et leur épaisseur, le bon comportement de la voie ferrée des points de vue rigidité, tenue du nivellement et drainage. Elles comprennent la couche de ballast et la sous-couche.

L'épaisseur et la nature des couches d'assise dépendent de plusieurs facteurs, notamment :

— Les caractéristiques intrinsèques des sols de plate-forme : nature, portance, sensibilité à l'eau et au gel, etc.

— Les caractéristiques globales de la plate-forme qui dépendent non seulement des propriétés du sol, mais aussi des conditions hydrogéologiques du site.

— Les conditions climatiques locales et les précipitations.

— Le trafic ferroviaire (tonnage journalier, charge par essieu, vitesse).

— L'équipement de la voie : distance entre traverses, leur composition, profil des rails, nature et espacement des traverses, etc.

8.1.1 Le ballast

Le ballast est un granulat de 25/50 mm utilisé actuellement en Algérie, il provient de concassage de roches dures (granite, quartzite, grès, gneiss, etc.. . .). La couche de ballast a une épaisseur de 25 à 30 cm.

Le ballast ferroviaire est constitué de pierres concassées dures de forme polyédrique avec des arêtes vives, possédant un fort angle de frottement interne (φ élevé) et une faible cohésion ($C = 0$). Il doit respecter la norme **NF P53-695** ainsi que les normes techniques de la **SNTF**.

Pour le tronçon PK 54 à PK 64, les spécifications du ballast sont les suivantes :

— Pierre rocheuse dure concassée, résistance à la compression $\geq 1\,200$ kg/cm^2 (soit ≥ 12 kN/cm^2).

— Granulométrie : maille $22{,}4/63$ mm ; limite de maille entre 31,5 et 50 mm : 50 %.

— Résistance à la fragmentation Los Angeles : ≤ 15 %.

— Résistance à l'usure Micro Deval : ≤ 6 %.

— Propreté : masse des éléments passant au tamis 1,6 mm $\leq 0{,}5$ %.

— Forme angulaire et rugosité garantissant la cohésion de la masse ballast-traverse.

— La granularité du ballast se situe à proximité dans la classe 25 à 50 mm (pierre cassée).

Rôles du ballast :

— Répartir sur la plate-forme les charges concentrées qu'elle reçoit des traverses.

— Amortir une partie très importante de la vibration grâce à ses propriétés rhéologiques.

— Assurer, en raison de sa granulométrie, le drainage rapide de la voie.

— Permettre de rectifier rapidement le nivellement au moyen du bourrage dressage mécanisme.

— Faciliter le drainage et supporter la charge des traverses.

— Assurer une répartition équilibrée des charges des trains sur la voie.

— Absorber et dissiper les vibrations générées par le passage des trains.

— Prévenir la croissance de plantes sous la voie.

8.1.2 La sous-couche

La sous-couche est une couche d'adaptation interposée entre ballast et plate-forme. Elle se compose généralement d'une couche de gravier bien graduée $(0/31{,}5$ mm) et d'une couche de fondation. Sur ce tronçon, des argiles limoneuses graveleuses ont été rencontrées, nécessitant une attention particulière au drainage et à la portance.

Une couche sous-ballast :

Le sous-ballast est essentiel dans la construction des voies ferrées. Il sert principalement à égaliser et réduire la raideur de l'assise. Composé de gravier propre bien gradué de 0/31,5 mm, avec au moins 30 % de matériau concassé ayant une DRG ≥ 12, il est compacté à 100 % OPN. En plus de l'égalisation, le sous-ballast aide à répartir les charges sur le sol de la plateforme.

Une couche de fondation :

La couche de fondation, généralement composée de grave propre bien graduée et compactée à 100 % OPN, supporte la circulation des engins de chantier avant l'installation du sous-ballast. Elle n'est pas nécessaire sur les sols de bonne qualité. Les matériaux doivent respecter des spécifications, comme le sous-produit de carrière du ballast (0/31,5 mm) avec un DRG > 10.

La sous-couche est pentée transversalement (en toit ou en pente unique) vers des dispositifs longitudinaux d'assainissement (déblais) ou vers l'extérieur de plateforme (remblais). La pente transversale minimale est de 4 %.

Rôles de la sous-couche :

- Préserver l'intégrité de la plateforme en minimisant les impacts des mouvements du sol.
- Assurer un bon écoulement des eaux de pluie.
- Renforcer la capacité portante en répartissant efficacement les charges sur la plateforme.
- Protéger la plateforme contre l'érosion et limiter les dommages dus aux mouvements du sol.
- Agir comme barrière empêchant les matériaux fins de contaminer le ballast.
- Amélioration de la portance par action sur la raideur et meilleure répartition des charges transmises.
- Contribution à l'amélioration des propriétés vibratoires.
- Anticontamination entre plate-forme et ballast.
- Évacuation des eaux.

8.1.3 La plateforme

La plateforme ferroviaire est la base sur laquelle repose la voie, formée de terres rapportées (remblais) ou du sol naturel (déblais) la plateforme est constituée principalement de sols argileux limoneux graveleux (A2/A3) et localement de grès (R43/R42).

Partie supérieure de l'ouvrage en terre supportant la sous-couche, la plate-forme est constituée de sol rapporté dans le cas d'un remblai ou du sol en place dans le cas d'un déblai.

Rôles de la plateforme :

- Drainage des eaux de pluie et des eaux de surface vers les systèmes d'assainissement.
- Absorption des vibrations générées par le passage des trains.
- Prévention de l'infiltration de limons et d'argiles dans le ballast.

8.2 Classification des sols pour la plateforme

La qualité d'un sol dépend de deux paramètres principaux : l'identification géotechnique, utilisée pour déterminer la nature géotechnique du sol, et les conditions locales liées à l'hydrogéologie et à l'hydrologie.

Les conditions hydrogéologiques et hydrologiques sont considérées comme optimales si :

- Il est important que la couche supérieure du sol ne soit pas située au-dessus d'une nappe phréatique naturelle, avec la mesure du niveau de la nappe effectuée avant toute intervention de rabattement complémentaire et en période climatique défavorable.
- On considère que la plateforme est en bon état si elle ne subit pas de percolations naturelles d'eau à travers le sol, que ce soit de manière transversale, longitudinale ou verticale, qui pourraient être potentiellement polluées.
- Les eaux de pluie sont évacuées correctement de la plateforme et les dispositifs longitudinaux de drainage sont en bon état de fonctionnement.

Si l'une au moins de ces trois conditions n'est pas remplie, les conditions hydrogéologiques et hydrologiques sont réputées mauvaises.

On distingue, selon que les conditions ci-dessus soient bonnes ou mauvaises et selon les modalités de tableau, les quatre classes de qualité **QSi** de sols.

Les résultats des investigations géotechniques menées sur le tronçon PK 54 à PK 64 ont permis de classer les sols selon la norme **NFP 11-300 (GTR)** et la fiche **UIC 719R**.

TABLE 8.1 – Classification des sols rencontrés sur le tronçon PK 54 – PK 64

PK	Nature du terrain	Paramètres mécaniques C (kPa) / φ (°)	Classe GTR	Classe UIC
54+000 → 56+775	Grès	C=17, φ=27	R43	QS2
	Argile limoneuse graveleuse	C=14, φ=31	A2	QS1
	Alluvion	C=5, φ=30	B6	
58+000 → 58+138	Argile limoneuse graveleuse	C=14, φ=31	A2	QS1
	Argile grise compacte	C=11, φ=24	A3	
58+260 → 58+650	Alluvion	C=5, φ=30	B6	QS1
	Argile limoneuse	C=14, φ=31	A2	
	Argile grise compacte	C=11, φ=24	A3	
62+050 → 62+250	Argile limoneuse graveleuse	C=14, φ=31	A2	QS1
62+ → 64+000	Argile limoneuse graveleuse	C=14, φ=31	A2	QS1

Les sols rencontrés sont en grande partie de classe A (argiles limoneuses graveleuses A2 et A3) et localement de classe R (grès, R43). Selon la fiche UIC 719R, ces matériaux sont de qualité **QS1** (sols médiocres) et **QS2** (sols moyens), avec une prédominance de la classe QS1 sur l'ensemble du tronçon.

8.3 La classe de portance de la plateforme

La détermination des types de plateforme dépend des caractéristiques des sols qui composent le sommet des remblais ou des sols en place au niveau de la fondation de la plateforme en excavation. Ces caractéristiques incluent le type et l'état hydrique des sols, ainsi que leur épaisseur. Selon le code **UIC 719R**, ces facteurs permettent de définir les classes de qualité des sols et donc la classe de portance de la plateforme.

D'après les spécifications de la fiche **UIC 719R**, trois catégories de plateforme sont définies en fonction de la capacité portante : **P1** (médiocre), **P2** (moyenne) et **P3** (bonne).

TABLE 8.2 – Classe de portance de la plateforme – Fiche UIC 719R

Classe de qualité du sol	Classe de la plateforme	Qualité couche de forme	Épaisseur min. (m)
QS1	P1	QS1	–
	P2	**QS2**	**0,50**
	P2	QS3	0,35
	P3	QS3	0,50
QS2	P2	QS2	–
	P3	QS3	0,35
QS3	P3	QS3	–

Plateforme proposée pour le tronçon PK 54 – PK 64

Compte tenu de la classification géotechnique majoritairement QS1, et en tenant compte du tonnage journalier et des prescriptions des UIC, nous préconisons l'adoption d'une **plateforme de classe P2** (plate-forme de moyenne qualité). Ce choix assure une infrastructure ferroviaire adaptée aux charges des trains de la ligne, tout en optimisant les coûts de construction.

Selon le tableau UIC 719R (p. 34), pour un sol **QS1** devant atteindre la classe **P2**, il faut réaliser une couche de forme de qualité **QS2** avec une épaisseur minimale de $e_f = \mathbf{0{,}50\,m}$.

Couche de forme

Sur les matériaux **QS1**, une couche de forme dont la qualité de sol est **QS2** et cela sur une épaisseur minimale de $\mathbf{0{,}50\,m}$ est requise pour atteindre la plateforme **P2**.

Les caractéristiques requises pour la couche de forme QS2 sont :

— Type de matériaux : B3, CiBi, D2, D3, R21, R41, R61, F31, F71.

— Résistance : $R = LA + MDE \leq 60$.

— Dimensions : $20 \leq D \leq 125$ mm ; coefficient de forme $A \leq 25$.

— Propreté : VBS < 2 ; compacité ≥ 80 %.

— Limite de liquidité ≤ 35 % ; indice de plasticité ≤ 15 %.

— Compactage à 100 % de la densité sèche optimum Proctor modifié.

— Module de déformabilité : $E_{v2} \geq 80$ MPa ; rapport $E_{v2}/E_{v1} \leq 2{,}2$.

8.4 Calcul des épaisseurs minimales des couches d'assise

Le calcul de l'épaisseur requise est déterminé à partir de la formule fournie dans le code **UIC 719R**, en utilisant les paramètres appropriés pour la section étudiée.

Selon les directives de la fiche **UIC 719R**, l'épaisseur du ballast et des sous-couches est déterminée par la formule suivante :

$$e \geq E + a + b + c + d + f + g \tag{VIII.1}$$

Où e représente l'épaisseur totale du ballast et des sous-couches, avec :

— E : classe de la plateforme (P1, P2, P3).

— a : classe de la voie (groupe UIC 1 à 6, voir UIC 714).

— b : type et longueur de la traverse.

— c : ligne nouvelle.

— d : charge maximale à l'essieu.

— f : type de plateforme et vitesse de référence.

— g : géotextile.

8.5 Application au projet — Tronçon PK 54 à PK 64

Le tronçon PK 54 à PK 64 constitue une ligne mixte (voyageurs et marchandises) sur laquelle circulent des trains de voyageurs ainsi que des trains miniers de forte charge. Le dimensionnement de la structure d'assise doit tenir compte des caractéristiques les plus contraignantes du trafic afin d'assurer la sécurité et la pérennité de l'infrastructure.

E = 0,35 m pour les plateformes de classe de portance **P2**.

Justification des paramètres UIC 719R :

- $E = 0{,}35$ m : valeur tabulée UIC 719R pour classe de portance **P2**.
- $a = 0$ m : pour les groupes UIC 1 et 2.
- $b = \dfrac{2{,}50 - 2{,}24}{2} = 0{,}13$ m, pour les traverses béton (monoblocs) de type **B440 (Vax U31)** avec $L = 2{,}24$ m.
- $c = 0$: pour un dimensionnement normal.
- $d = 0{,}05$ m : étant donné que le tonnage sur cette ligne mixte (trains miniers) est de 22.5t/es .
- $f = 0$: pour toutes les lignes parcourues à $V \leq 160$ km/h et pour les plates-formes de portance **P2**.
- $g = 0$: pas de géotextile lorsque la couche de forme est en sol **QS2**.

$$e = 0{,}35 + 0 + 0{,}13 + 0 + 0{,}05 + 0 + 0 = 0{,}53\,\text{m} \tag{VIII.2}$$

Soit approximativement **0,55 m**. Le dimensionnement pour une charge de 22,5 tonnes par essieu avec mesure de predence on a opter a une augmentation de l'épaisseur de la sous-couche de 10 centimètres par rapport à la valeur calculée, afin de couvrir l'ensemble du trafic mixte de la ligne.on

$$e = 0{,}55 + 0{,}10 = \mathbf{0{,}65}\,\text{m} \tag{VIII.3}$$

La structure de voie retenue pour le tronçon mixte PK 54 à PK 64 est :

— Épaisseur de la couche de **ballast** : **0,30 m**.

— Épaisseur de la couche de **sous-ballast** : **0,20 m**.

— Épaisseur de la couche de **fondation** : **0,15 m**.

— Épaisseur de la couche de **Forme (QS2)** : **0,50 m** (requis pour atteindre P2 depuis QS1).

8.6 Caractéristiques des matériaux

8.6.1 Matériaux pour couche de forme ferroviaire

Conformément à la fiche n°4 du document **ST N°590 B** et à la fiche **UIC 719R** :

— Couche de forme d'épaisseur 50 cm, qualité QS2.

— Type : B3, CiBi, D2, D3, R21, R41, R61, F31, F71 — Désignation : Grave 0/D.

— Résistance : $R = LA + MDE \leq 60$.

— $20 \leq D \leq 125$ mm ; coefficient de forme $A \leq 25$; VBS < 2.

— $E_{v2} \geq 80$ MN/m^2 (essai de plaque).

8.6.2 Matériaux pour couche de fondation ferroviaire

Conformément à la fiche n°2 du document **ST N°590 B** :

— Épaisseur : 20 cm ; type : B5, D, R21, R41, R61 — Désignation : Grave sableuse.

— Résistance : $R = LA + MDE \leq 50$.

— Dimensions : $d = 0$ et $20 \leq D \leq 40$ mm ; $A \leq 25$; VBS < 1 ; compacité ≥ 80 %.

8.6.3 Matériaux pour sous-ballast

Conformément à la fiche n°1 du document **ST N°590 B** :

— Épaisseur : 20 cm ; type : D2, D3, R21, R41, R61.

— Désignation : Grave $0/31{,}5$ mm bien graduée.

— Résistance : $R = LA + MDE \leq 40$; compacité ≥ 82 % ; VBS < 1.

8.6.4 Ballast

— Pierre rocheuse dure concassée, résistance à la compression $\geq 1\,200$ kg/cm^2.

— Granulométrie : maille 22,4/63 mm ; limite 31,5–50 mm : 50 %.

— Résistance Los Angeles ≤ 15 % ; Micro Deval ≤ 6 %.

— Forme polyédrique à arêtes vives ; éléments passant 1,6 mm $\leq 0{,}5$ %.

8.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de définir et de dimensionner la structure d'assise ferroviaire adaptée aux conditions géotechniques du tronçon **Bouchegouf – Souk Ahras** entre le **PK 54** et le **PK 64**. Les résultats de la campagne géotechnique ont montré que les sols support sont majoritairement de classe **QS1** (argiles limoneuses graveleuses) avec des passages locaux en **QS2** (grès).

En application de la fiche UIC 719R et des spécifications techniques SNTF (ST 590B), une **plateforme de classe P2** a été retenue, nécessitant la mise en place d'une couche de forme QS2 de **50 cm** d'épaisseur. L'épaisseur minimale théorique de ballast + sous-couches a été calculée à **0**,**55** m, majorée à **0**,**65** m pour couvrir l'ensemble du trafic mixte.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 8.3 – Récapitulatif des épaisseurs des couches d'assise (QS1 $\rightarrow$ P2, UIC 719R)

Couche	**Épaisseur**
Ballast	0,30 m
Sous-ballast	0,20 m
Couche de fondation	0,15 m
Épaisseur totale e	**0,65 m**
Couche de forme (QS2)	**0,50 m**

Rappel des hypothèses clés (UIC 719R) :

— Sol classé **QS1** avec fragments de **QS2** (argiles limoneuses graveleuses/grès, classification GTR A2/A3/R43).

— Objectif de plateforme : **P2** (moyenne qualité).

— Couche de forme requise : qualité **QS2**, épaisseur minimale **0,50 m**.

— Charge d'essieux : **22,5 t/essieu** ($d = 0{,}05$ m + majoration 0,10 m), couvrant le trafic mixte voyageurs et marchandises.

— Vitesse $V \leq 160$ km/h ($f = 0$).

— Traverses béton (monoblocs) de type **B440 (Vax U31)** avec $L = 2{,}24$ m.

Chapitre IX

Profil en travers

Introduction

Le profil en travers est important pour la conception et la construction des projets ferroviaires. Il définit les dimensions de la voie, les pentes des talus, les systèmes d'assainissement,

Un profil en travers type, utilisé pour les sections homogènes de la voie ferrée, regroupe toutes les dimensions et détails nécessaires, notamment la largeur de la voie, les couches de la superstructure, les pentes des talus, les fossés et les murs de soutènement. Cela permet d'éviter de dessiner chaque profil avec des dimensions spécifiques, simplifiant ainsi la conception du projet et optimisant le temps.

9.1 Les éléments du profil en travers

Le profil en travers type doit inclure les éléments suivants :

9.1.1 Éléments de superstructure :

- Le type de rail utilisé.
- La valeur de l'écartement de la voie.
- La distance entre les axes (cas de plusieurs voies), pour notre projet on a une seule voie.
- Le type de traverse utilisé.
- La valeur de devers en courbe (maximum).
- L'épaisseur de la couche de ballast.

9.1.2 Éléments de l'infrastructure :

- Les épaisseurs et la nomination de chaque couche.
- Les pentes transversales de chaque couche.
- La pente latérale de la plate-forme.

9.1.3 Éléments du talus :

- La pente de chaque talus.

9.1.4 Éléments d'assainissement :

— Le type et dimension des ouvrages d'assainissement et/ou des draines.

9.2 Profil en travers type de mon projet

Le profil type utilisé sur notre tronçon a été choisi selon les exigences de la SNTF, il est le suivant :

— Les rails UIC-60 sont espacés de 1435 mm avec des travers Bibloc B440 (Vax U31).

— Type de ligne : voie double mixte.

— La voie repose sur une plateforme de 12,6 m de largeur.

— Entraxe entre les deux voies 4m.

— La pente en toit de la plateforme est de 4 %.

— Largeur de marche pied (piste) : 1 m.

— Les talus $H < 8$ m :
de déblais : 3H/2V en pente,
de remblais : 3H/2V en pente.

— Les talus $H > 8$ m :
de remblais : 2H/1V en pente (talus = 6 m hauteur avec bermes = 2 m).
de déblais : 2H/1V en pente (talus = 6 m hauteur avec bermes = 2 m).

— Épaisseur du ballast : 30 cm.

— Épaisseur de la sous-ballast : 20 cm.

— L'épaisseur de la couche de fondation est de 15 cm.

— L'épaisseur de la couche de forme est de 50 cm.

— Fossé trapézoïdal ($b = 0{,}50$ m ; $h = 0{,}6$ m).

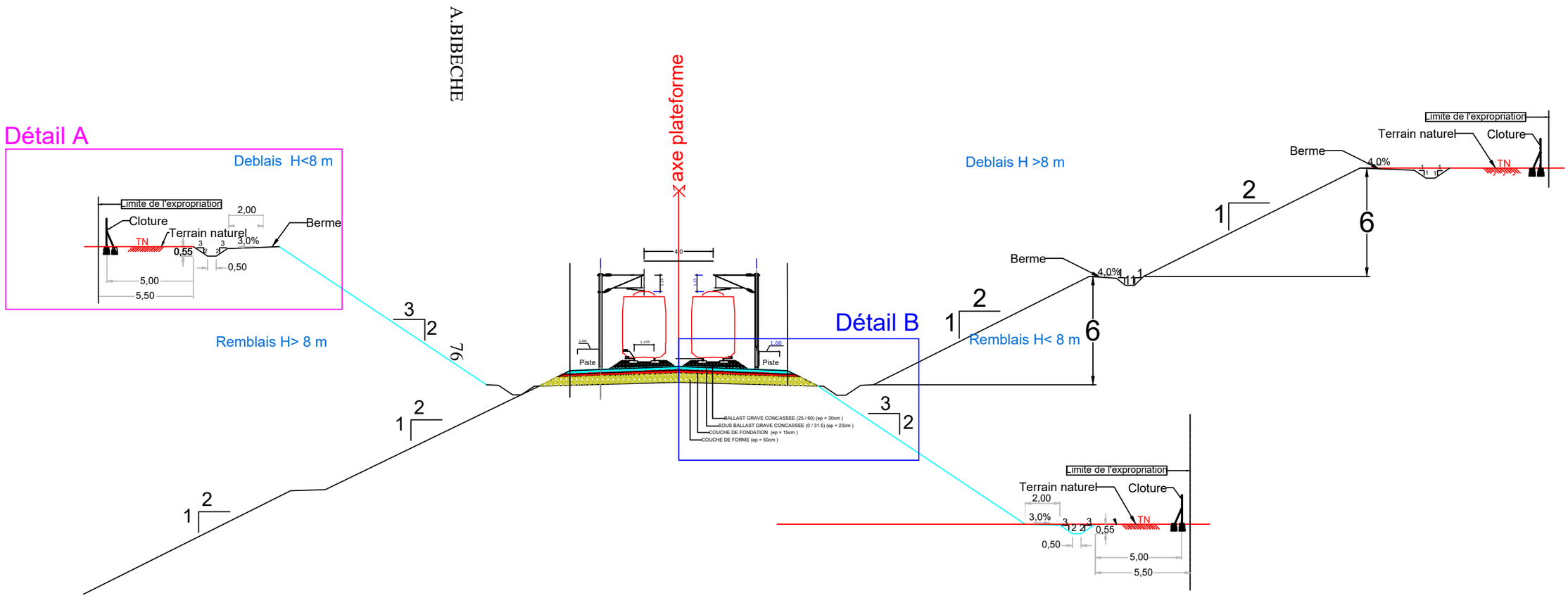
Afin de s'adapter aux configurations topographiques du tracé, quatre (04) profils en travers types ont été définis. Le choix du modèle dépend directement de la nature des travaux (déblai ou remblai) et de la hauteur critique des talus (H), conformément aux exigences de la SNTF :

TABLE 9.1 – Caractéristiques des talus selon la nature et la hauteur

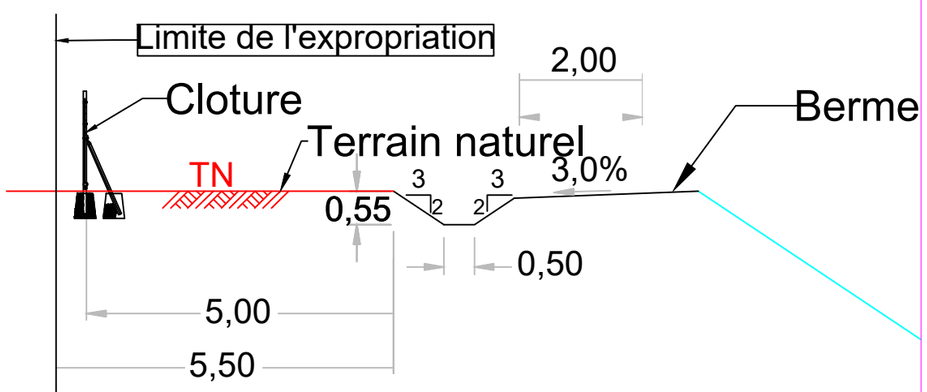
Hauteur (m) / Nature	**Inférieur à 8 m**	**Supérieur à 8 m**
Déblai	– **Pente talus :** $3H/2V$ pour la stabilité naturelle. – **Assainissement :** Fossé trapézoïdal ($b = 0{,}50$ m ; $h = 0{,}60$ m) systématique en pied de talus.	– **Pente talus :** Adoucie à $2H/1V$ pour limiter les risques d'instabilité en grande profondeur. – **Stabilisation :** Passes successives de 6 m max, séparées par des bermes de banquette de 2 m. – **Assainissement :** Collecte des eaux de ruissellement assurée par un assainissement intégré sur les bermes.
Remblai	– **Pente talus :** $3H/2V$ pour la stabilité mécanique. – **Assainissement :** Fossé trapézoïdal ($b = 0{,}50$ m ; $h = 0{,}60$ m) systématique en pied de talus.	– **Pente talus :** Fixée à $2H/1V$. – **Stabilisation :** Passes successives de 6 m max, séparées par des bermes de banquette de 2 m. – **Assainissement :** Collecte des eaux de ruissellement assurée par un assainissement intégré sur les bermes.

Les profils en travers utiliser don mon projet sont :

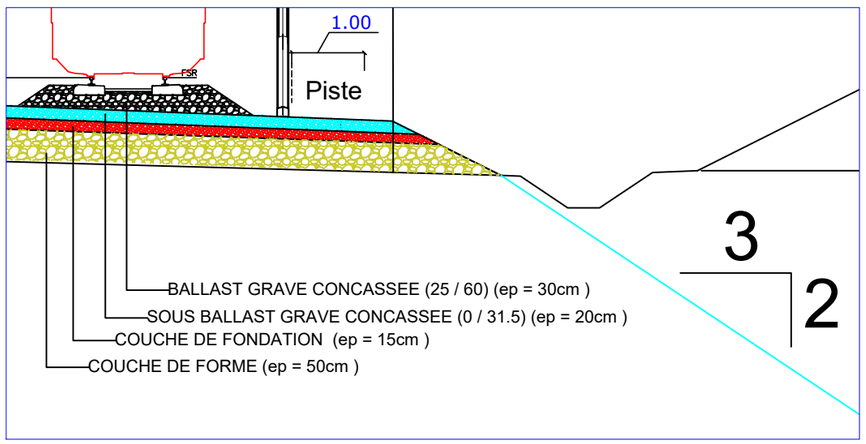
PROFIL EN TRAVERS TYPE



Détail A: echelle 1:100



Détail B: echelle 1:100



ENSTP
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

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'études	Réalisé par	Encadré par	Echelle	N°Planche	Année universitaire
Etude en APD de la ligne ferroviaire BOUCHEGOUF-SOUK AHRAS du (Pk 54-64) avec une gare de dépassement	Bibeche Abderraouf	Mr. Goumettre Ahmed	Ech H: 1/250 Ech V: 1/250	-	2025/2026

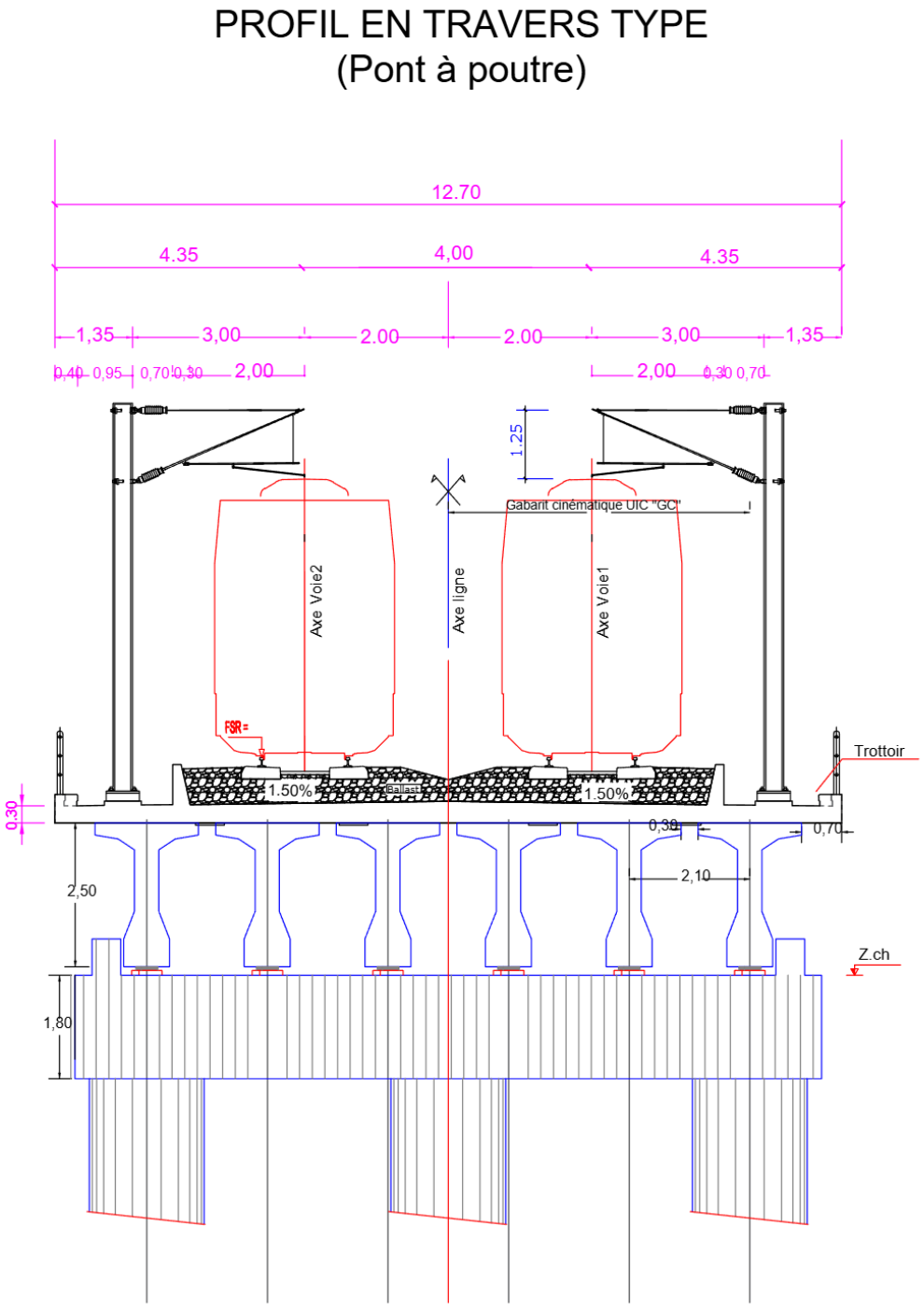


FIGURE 9.1 – Profil en travers type :Section (PONT POUTRE)

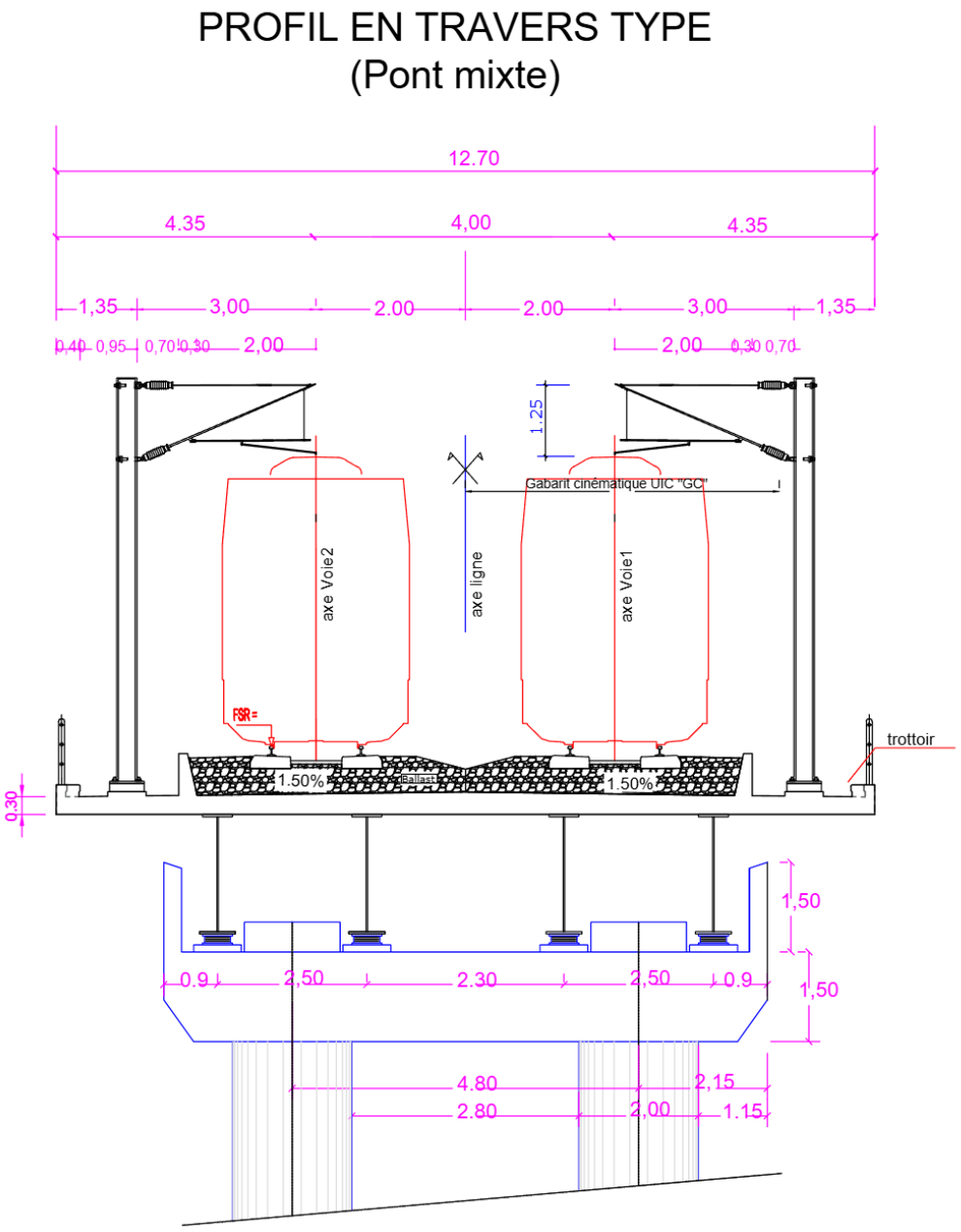


FIGURE 9.2 – Profil en travers type : Section (PONT MIXTE)

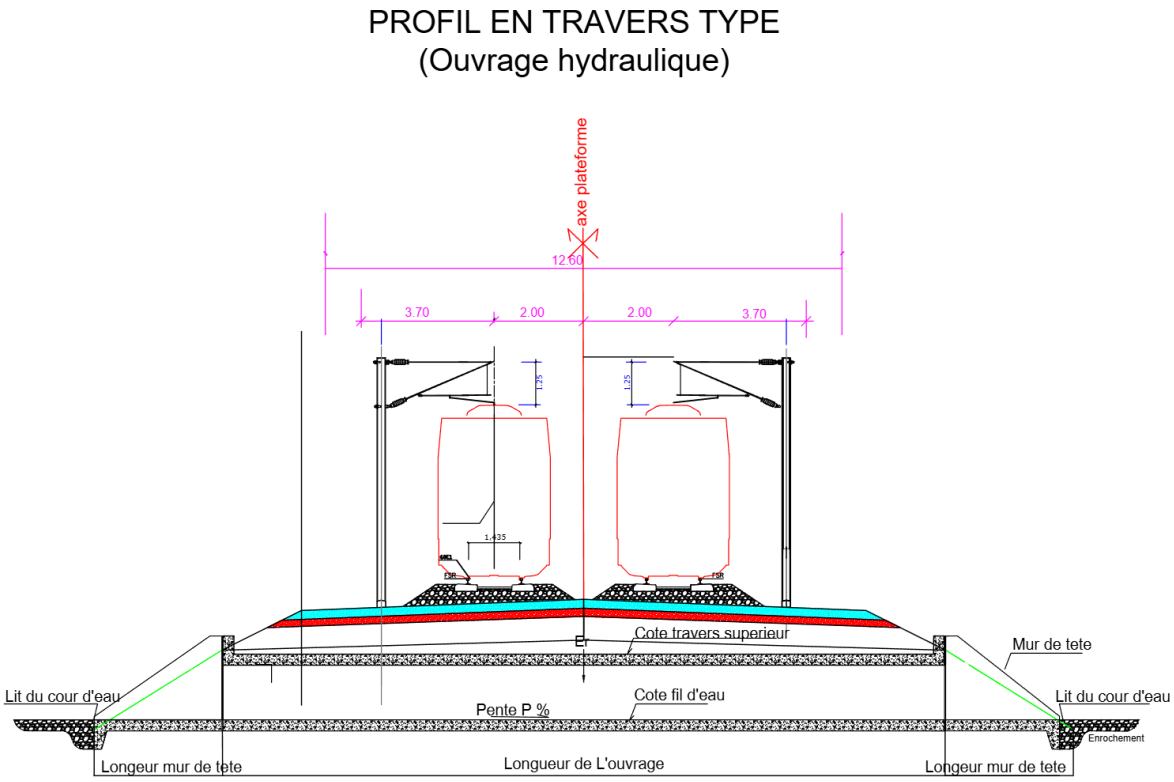


FIGURE 9.3 – Profil en travers type : Section OUVRAGE HYDRAULIQUE

9.3 Cubatures et quantification

9.3.1 Quantification des matériaux de la superstructure et de l'infrastructure

Afin de compléter l'évaluation quantitative du projet sur les 10 km du tracé (voie double), les volumes des différentes couches d'assise (présentant une section géométrique trapézoïdale) ainsi que les constituants de l'armement de la voie ont été rigoureusement calculés.

A. Éléments d'armement de la voie (Superstructure)

Pour une voie double sur un linéaire de 10 km, les besoins en composants sont les suivants :

— **Traverses :** Le taux de pose réglementaire est de 1666 traverses par kilomètre et par voie.

$$\text{Nombre total} = 166610\,\text{km2}\,\text{voies} = 33\,320\ \text{traverses}$$

— **Rails (UIC-60) :** Une voie double comprend 4 files de rails distinctes.

$$\text{Linéaire total de rail} = 10\,\text{km4}\ \text{files} = 40\,\text{km linéaire de rail}$$

B. Cubatures des couches du corps de la voie

Chaque couche présente une section transversale trapézoïdale en raison des pentes de talus de corps de voie. Les volumes sont exprimés par mètre linéaire (m^3/m) puis extrapolés pour l'ensemble du projet (10 km = 10 000 m).

TABLE 9.3 – Cubatures et caractéristiques géométriques des couches d'assise (Voie double – 10 km)

Couche d'assise	**Épaisseur** (m)	**Section** (m^2)	**Vol. par mètre linéaire** (m^3/m)	**Vol. Total** (m^3)
Couche de Ballast	0,30	1,98	1,98	19 800,0
Couche de Sous-Ballast	0,20	2,58	2,58	25 800,0
Couche de Forme	0,50	7,10	7,10	71 000,0
Couche de Fondation	0,15	2,01	2,01	20 100,0

9.3.2 Calcul des cubatures de terrassement

Les cubatures de terrassement représentent l'évolution des volumes de déblais et de remblais que comporte le projet afin d'obtenir une surface uniforme et parallèlement sous-jacente à la ligne de projet.

Les éléments qui permettent cette évolution sont :

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

Le tableau suivant représente les résultats de calcul automatique des terrassements globaux pour le tronçon de 10 km :

TABLE 9.4 – Résultats du calcul des volumes de terrassement globaux (PK 54+000 – PK 64+000)

Poste de terrassement	**Volume (m^3)**
Volume de Déblais	3 867 948
Volume de Remblais	555 125

Le tableau des quantités et volumes est présenté ci-dessous :

TABLE 9.5 – Synthèse quantitative générale du projet

Matériaux / Postes	**Quantité / Volume**
1. Armement	
– Traverses	33 320 U
– Rails (UIC-60)	40 km
2. Superstructure	
– Ballast	19 800,0 m^3
– Sous-ballast	25 800,0 m^3
– Matériaux pour couche de forme	71 000,0 m^3
– Matériaux pour couche de fondation	20 100,0 m^3
3. Terrassement	
– Volume de Déblais	3 867 948,6 m^3
– Volume de Remblais	555 125,6 m^3

Chapitre X

Conception de la gare de croisement

10.1 Introduction

Le tronçon Bouchegouf – Souk Ahras est constitué, sur toute sa longueur, d'une **double voie principale** (V1 et V2). Au droit de la section **PK 61+050 – PK 63+750**, une gare de croisement et de garage (PCG) est implantée. Elle comporte, en plus des deux voies principales V1 et V2, une **seconde double voie** (V3 et V5), disposée du côté gauche de la voie principale, dédiée au croisement et au garage des trains. L'écartement (entre-axe) retenu entre toutes les voies de la gare est de **5,00 m**.

Ce chapitre présente la configuration générale de la gare, l'implantation des appareils de voie (ADV), le calcul du garage franc et la longueur utile de chacune des quatre voies.

10.2 Localisation et caractéristiques générales

TABLE 10.1 – Caractéristiques générales de la gare

Paramètre	**Valeur**
PK début de la gare	61+050
PK fin de la gare	63+750
Longueur totale de la gare	2700 m
Nombre de voies	4 (V1, V2, V3, V5)
Voies principales	V1, V2
Voies de service / garage	V3, V5 (côté gauche de la voie principale)
Entre-axe entre les voies (entre V3 et V5 / entre V3 et V1)	5,00 m
Type d'appareil de voie (ADV)	UIC60 – 500 – 1/12 (tan α = 0,083)

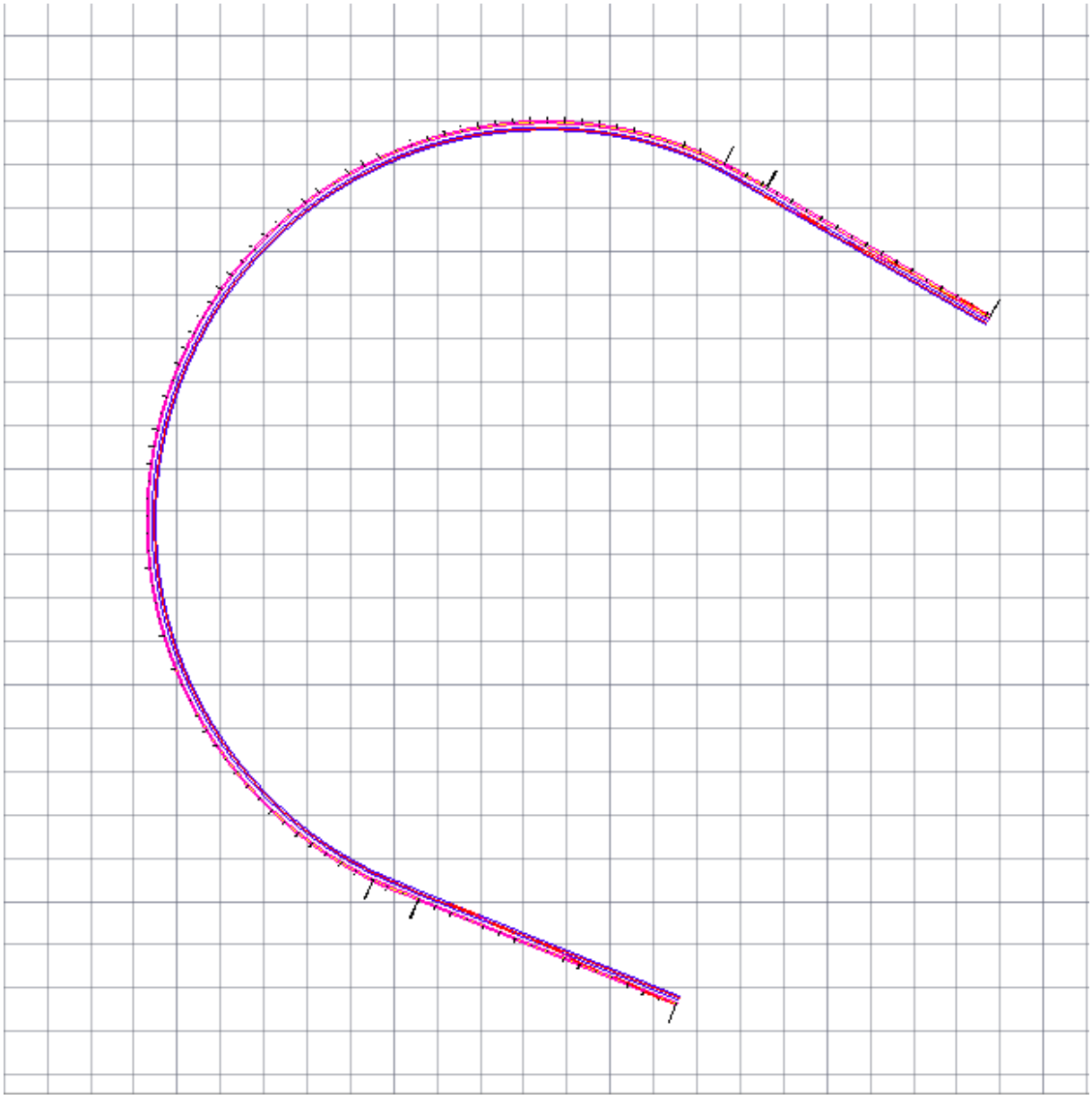
La voie V1 et la voie V2 constituent la double voie courante du tronçon et traversent la gare de part en part, sans déviation. Les voies V3 et V5 forment la seconde double voie de garage/croisement ; elles se raccordent à la voie principale par des appareils de voie aux deux extrémités de la gare.

10.3 Configuration transversale des voies

En section courante, les deux voies principales V1–V2 sont espacées d'un entre-axe de 4,2 m (cf. profil en travers type, chapitres VIII et IX). Dans la zone de gare, l'ajout de la seconde double voie (V3–V5) impose un **entre-axe de 5,00 m** entre les trois voies, soit :

TABLE 10.2 – Entre-axes des voies dans la gare

Voies considérées	Entre-axe (m)
V1 – V2	4,00
V1 – V3	5,00
V3 – V5	5,00
Largeur totale (axe V5 – axe V2)	**14,00**



(PK 61+050 – PK 63+750)

FIGURE 10.1 – Tracé en plan de la gare de croisement – vue générale

10.4 Appareils de voie (ADV)

Chaque raccordement entre une voie principale (V1 ou V2) et une voie de garage (V3 ou

V5) nécessite un appareil de voie en entrée et un appareil de voie en sortie de gare.

Le type retenu pour l'ensemble des ADV de la gare est **UIC60 – 500 – 1/12**

(tan $\alpha = 0{,}083$), conformément au standard adopté pour ce projet.

TABLE 10.3 – Proposition d'implantation des appareils de voie (ADV)

N° ADV	Voie raccordée	PK d'implantation	Type ADV	DEVIATION
ADV 1	V2 → V1	61+072	UIC60-500-1/12	DG
ADV 2	V1 → V2	61+121	UIC60-500-1/12	DG
ADV 3	V1 → V3	61+191	UIC60-500-1/12	DG
ADV 4	V3 → V1	61+251	UIC60-500-1/12	DG
ADV 5	V3 → V5	61+333	UIC60-500-1/12	DG
ADV 6	V5 → V3	61+393	UIC60-500-1/12	DG
ADV 7	V5 → V3	63+439	UIC60-500-1/12	DD
ADV 8	V3 → V5	63+449	UIC60-500-1/12	DD
ADV 9	V3 → V1	63+571	UIC60-500-1/12	DD
ADV 10	V1 → V3	63+631	UIC60-500-1/12	DD
ADV 11	V1 → V2	63+700	UIC60-500-1/12	DD
ADV 12	V2 → V1	63+748	UIC60-500-1/12	DD

Les PK d'implantation des ADV 1 et 2 (resp. ADV 3 et 4) sont décalés de 50 m l'un par rapport à l'autre afin de respecter le rayon minimal de raccordement entre les voies V1–V3 et V2–V5 (à vérifier en phase d'avant-projet détaillé).

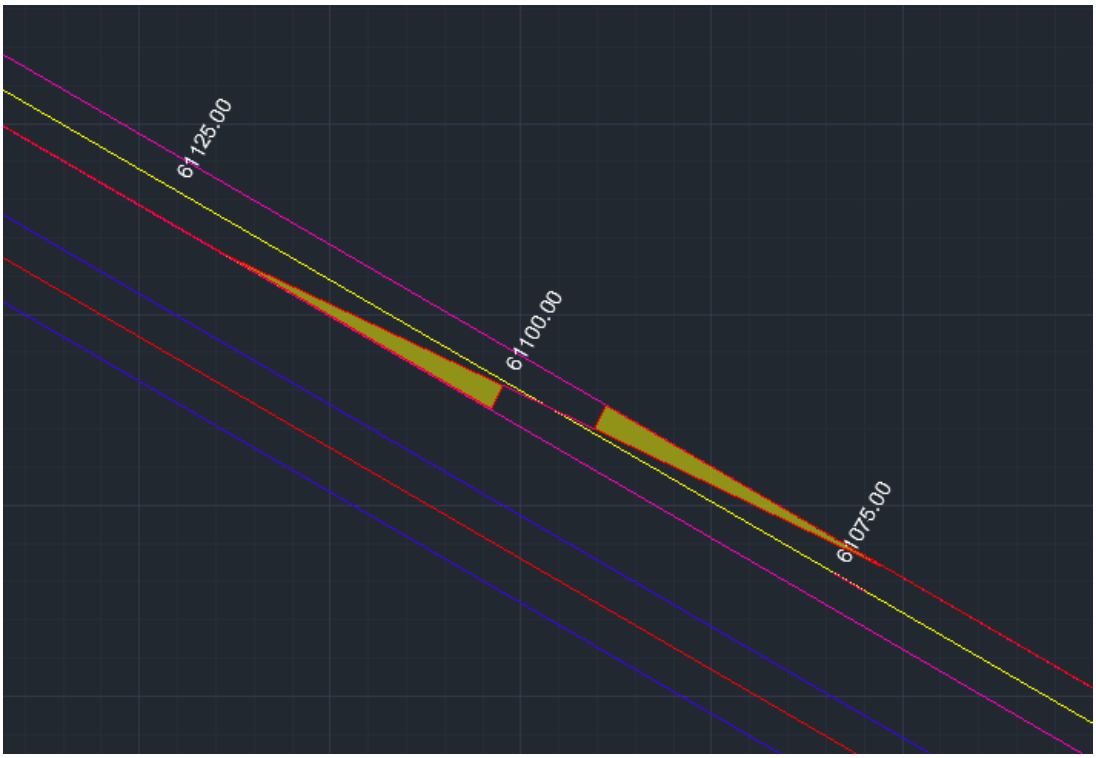


FIGURE 10.2 – Détail des appareils de voie type UIC60-500-1/12

10.5 Garage franc

La distance de garage franc (GF), exprimée en mètres, est donnée par la relation :

$$GF = 3{,}57 \cdot n + 1$$

avec $n = 1\frac{}{\tan\alpha}$

Pour un appareil de voie UIC60–500–1/12 (tan $\alpha = 0{,}083$, soit $n = 12$) :

$$GF = 3{,}57\ 12 + 1 = 43{,}84\ \text{m}$$

Cette valeur de garage franc détermine la position de la limite de sécurité au-delà de laquelle un convoi en stationnement engagerait le gabarit de la voie adjacente. Le tableau suivant présente la localisation exacte du point de garage franc pour chaque appareil.

TABLE 10.4 – Tableau d'implantation des points de garage franc (GF) par appareil de voie

N° ADV	PK d'implantation	Type d'ADV	Distance GF (m)	PK du Garage Franc
ADV 1	61+072	UIC60-500-1/12	43,84	61+114
ADV 2	61+121	UIC60-500-1/12	43,84	61+079
ADV 3	61+191	UIC60-500-1/12	43,84	61+233
ADV 4	61+251	UIC60-500-1/12	43,84	61+209
ADV 5	61+333	UIC60-500-1/12	43,84	61+375
ADV 6	61+393	UIC60-500-1/12	43,84	61+351
ADV 7	63+439	UIC60-500-1/12	43,84	63+397
ADV 8	63+449	UIC60-500-1/12	43,84	63+491
ADV 9	63+571	UIC60-500-1/12	43,84	63+529
ADV 10	63+631	UIC60-500-1/12	43,84	63+673
ADV 11	63+700	UIC60-500-1/12	43,84	63+658
ADV 12	63+748	UIC60-500-1/12	43,84	63+790

10.6 Longueur utile des voies

La longueur utile (LU) d'une voie correspond à la portion de voie disponible et sécurisée pour le stationnement, le croisement ou le dépassement d'un train, déduction faite du garage franc à chaque extrémité. Selon la SNTF, les longueurs utiles minimales requises sont :

— **426 m** pour les trains voyageurs ;

— **870 m** pour les trains de marchandises.

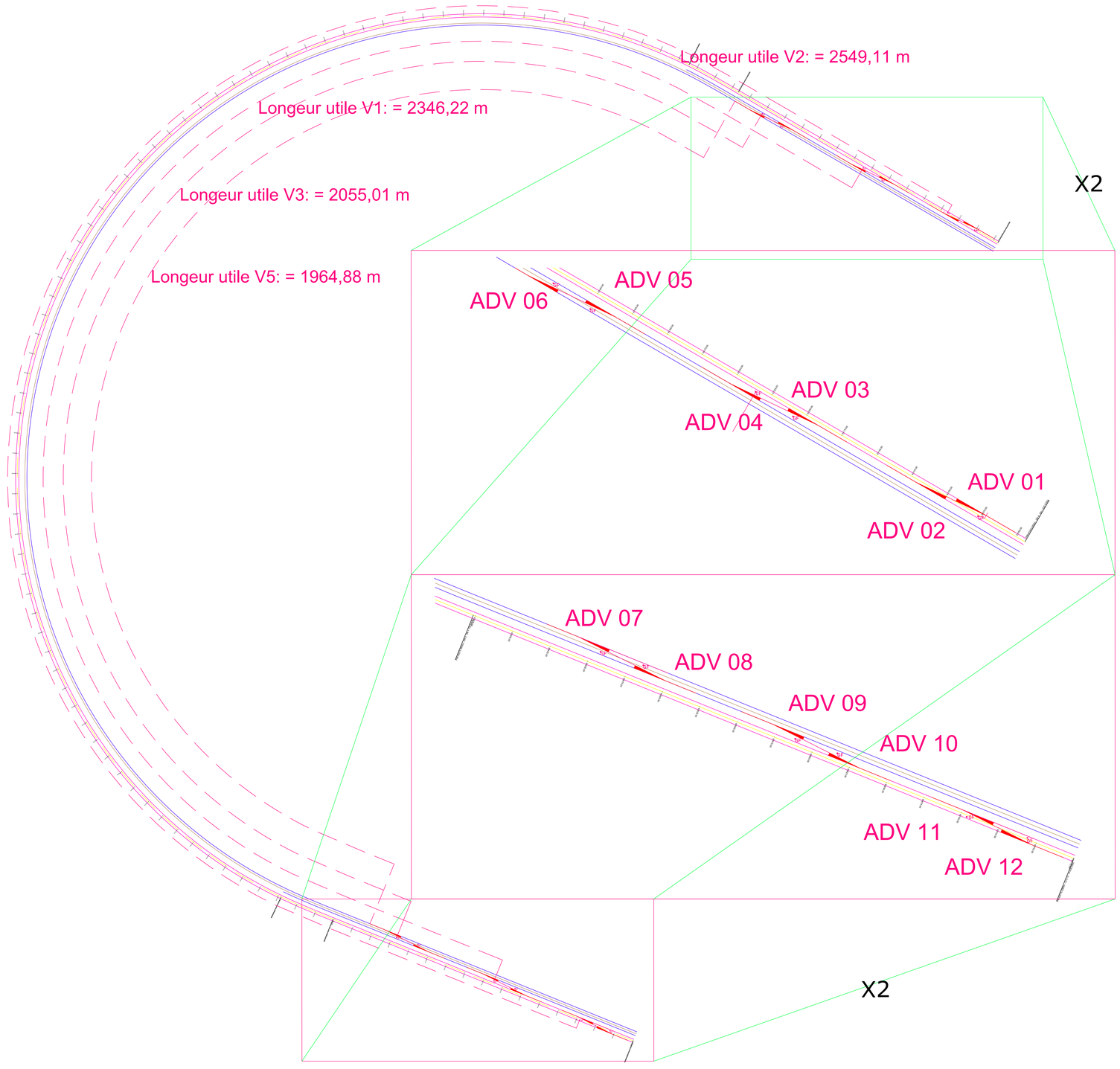
La gare étant conçue pour un trafic de **marchandises**, c'est la valeur de 870 m qui constitue le seuil minimal à respecter pour les voies V3 et V5. Les voies V1 et V2, traversant la gare de part en part sans appareil de voie intermédiaire, disposent d'une longueur utile égale à la longueur totale de la gare.

TABLE 10.5 – Calcul des longueurs utiles des voies de la zone d'étude

Désignation	Origine (GF)	Extrémité (GF)	Formule de Calcul	Longueur Utile (m)
Voie 1 (V1)	ADV 2 (61+079)	ADV 11 (63+658)	63658 – 61079	2 579 m
Voie 2 (V2)	ADV 1 (61+114)	ADV 12 (63+790)	63790 – 61114	2 676 m
Voie 3 (V3)	ADV 4 (61+209)	ADV 9 (63+529)	63529 – 61209	2 320 m
Voie 5 (V5)	ADV 6 (61+351)	ADV 7 (63+397)	63397 – 61351	2 046 m

10.7 Conclusion

La gare implantée entre le PK 61+050 et le PK 63+750 (longueur totale 2700 m) permet d'assurer le croisement et le garage des trains de marchandises grâce à une seconde double voie (V3, V5) disposée à 5,00 m d'entre-axe par rapport aux voies principales (V1, V2). Les longueurs utiles proposées dans le tableau X.5 satisfont largement le seuil minimal SNTF de 870 m pour le trafic marchandises. Les implantations des points de sécurité définies au tableau X.4 garantissent une exploitation sans risque de nez-à-nez ou d'engagement de gabarit. Ces valeurs restent à confirmer et ajuster en phase d'avant-projet détaillé en fonction du tracé en plan réel et des contraintes topographiques relevées sur site.



الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
École Nationale Supérieure des Travaux Publics

National School of Built and Ground works Engineering
Francis Jeanson

ENSTP
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Build and Ground works engineering

INTITULE : **Etude en APD de la ligne ferroviaire**
BOUCHEGOUF-SOUK AHRAS du (Pk 54-64)
avec une gare de dépassement

AUTEURS DE PROJET:	Mr : Bibeche Abderraouf
ENCADRE PAR :	Mr: Goumettre Ahmed
PLANCHE N°	N°: 02
ECHELLE	1: 400
ANNEE UNIVERSITAIRE	2025/2026

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

Chapitre XI

Signalisation, Télécommunication et Sécurité (ERTMS)

11.1 Introduction et Role de la Signalisation

11.1.1 Definition de la Signalisation Ferroviaire

La **signalisation ferroviaire** est l'ensemble des dispositifs et des regles permettant de garantir la **securite** et la **regularite** des circulations ferroviaires. Elle constitue le systeme nerveux du reseau ferre, assurant la coordination des mouvements des trains et la prevention des collisions.

La signalisation repose sur trois principes fondamentaux :

0. **La voie est unique :** Un seul train peut occuper une section de voie a la fois.
0. **L'autorite de depart :** Aucun train ne peut partir sans autorisation explicite.
0. **La protection des trains :** Tout train arrete doit etre protege contre les trains suivants.

11.1.2 Role de la Signalisation

La signalisation ferroviaire remplit plusieurs roles essentiels :

Role de Securite

Le role principal de la signalisation est de **prevenir les collisions** et les **deraillements**. Elle assure :

— La **separation** des trains par des espaces de securite

— La **protection** des zones de travail sur la voie

— La **gestion** des vitesses dans les zones a risque (courbes, aiguillages, passages a niveau)

— La **prevention** des depassements de vitesse

Role d'Exploitation

La signalisation permet d'**optimiser l'exploitation** du reseau en :

— Maximisant la **capacite** de la ligne (nombre de trains par heure)

— Minimisant les **temps de parcours**

— Gerant les **circulations** dans les gares et les bifurcations

— Coordonnant les **manoeuvres**

Role d'Information

La signalisation **informe** le conducteur sur :

— L'**etat de la voie** devant lui (libre, occupee, protegee)

— La **vitesse autorisee**

— Les **restrictions** de circulation (travaux, avaries)

— La **position** des aiguillages

11.1.3 Principes d'Implantation en Algerie

En Algerie, la signalisation ferroviaire est regie par les **normes de la Société Nationale des Transports Ferroviaires** et les **reglements de securite** des chemins de fer. Les principes d'implantation sont les suivants :

— La signalisation est **obligatoire** sur toutes les lignes ouvertes a la circulation publique.

— Les signaux sont implantes de maniere a etre **visibles** par le conducteur en toutes circonstances.

— La distance entre deux signaux consecutifs doit permettre le **freinage d'urgence** du train.

— Les signaux de protection sont places en **avance** des points dangereux (aiguillages, passages a niveau, zones de travaux).

11.2 Les Systemes de Cantonnement (Blocks)

11.2.1 Definition du Cantonnement

Le **cantonnement** (ou **block**) est le principe fondamental de la signalisation ferroviaire. Il consiste a **diviser la ligne en sections** (cantons) et a interdire la presence simultanee de deux trains dans le meme canton.

Un **canton** est une section de voie delimitee par deux signaux consecutifs. La longueur d'un canton doit etre au moins egale a la **distance d'arret** du train a la vitesse maximale.

11.2.2 Types de Cantonnement

Block Manuel

Dans le **block manuel**, la gestion des cantons est assuree par des **agents** (aiguilleurs) qui communiquent par telephone ou par signaux manuels. Ce systeme est :

— **Simple** et peu couteux en infrastructure

— **Lent** et peu adapte aux trafics denses

— **Sensible** aux erreurs humaines

Le block manuel est utilise sur les lignes secondaires a faible trafic.

Block Telephonique

Le **block telephonique** est une evolution du block manuel ou les agents utilisent le telephone pour s'echanger les autorisations de circulation. Il est plus rapide que le block manuel pur mais reste limite par les delais de communication.

Block Automatique a Voie Unique (BAVU)

Le **block automatique a voie unique** est un systeme automatique de gestion des cantons sur les lignes a voie unique. Il utilise des **compteurs d'essieux** ou des **detections de presence** pour suivre les trains.

Les principes du BAVU sont :

— Chaque canton peut etre occupe par **un seul train** a la fois.

— L'entree dans un canton est autorisee par un **signal**.

— La sortie d'un canton libere le canton precedent.

— Les gares de croisement permettent le **depassement** des trains.

Block Automatique Lumineux (BAL)

Le **block automatique lumineux** est le systeme le plus repandu sur les lignes a trafic moderé a dense. Il se caracterise par :

— Des **signaux lumineux** automatiques places le long de la voie

— Une **detection de l'occupation** des voies par circuits de voie ou compteurs d'essieux

— Une **logique de securite** qui commande les signaux en fonction de l'etat des cantons

Signaux du BAL Les signaux du BAL utilisent un code de **3 ou 4 feux** :

— **Vert (V)** : Voie libre, prochain signal ouvert

— **Jaune (A)** : Annonce, prochain signal ferme

— **Rouge (R)** : Arret, voie occupee ou protegee

— **Jaune + Rouge (RR)** : Ralentissement a 30 km/h (signal de manoeuvre)

TABLE 11.1 – Signification des signaux du BAL

Aspect	Signification	Action du conducteur
Vert	Voie libre	Vitesse normale
Jaune	Annonce d'arret	Ralentir, preparer l'arret
Rouge	Arret obligatoire	S'arreter avant le signal
Jaune + Rouge	Ralentissement 30 km/h	Passer a 30 km/h
Eteint	Signal eteint	Traiter comme rouge

Principe de Fonctionnement du BAL Le BAL fonctionne selon le principe de la **chute des signaux** :

0. Un train occupe un canton.
0. Le signal d'entree du canton passe au **rouge**.
0. Le signal precedent passe au **jaune** (annonce d'arret).
0. Le signal encore avant passe au **vert** (voie libre).
0. Lorsque le train libere le canton, les signaux remontent progressivement.

Avantages du BAL

— **Securite elevee** : La logique de securite est automatique et infalsifiable.

— **Capacite accrue** : Les trains peuvent circuler a des intervalles reguliers.

— **Flexibilite** : Adaptation automatique au trafic.

— **Fiabilite** : Moins d'interventions humaines, donc moins d'erreurs.

Block Automatique a Permissivite Restreinte (BAPR)

Le **BAPR** est une variante du BAL ou le conducteur peut franchir un signal ferme (rouge) a vitesse tres reduite (15–30 km/h) apres avoir obtenu une autorisation specifique. Ce systeme est utilise en cas de defaillance ou pour les manoeuvres.

11.2.3 Application au Projet

Pour le present projet (ligne a voie unique, vitesse 120 km/h, trafic mixte), le systeme de cantonnement retenu est le **Block Automatique a Voie Unique (BAVU)** avec des **signaux lumineux** aux entrees des gares et des signaux de manoeuvre dans la gare de depassement.

Les caracteristiques du systeme sont :

— **Signaux d'entree de gare** : Signaux a 3 feux (V, A, R) places en entree de la gare de depassement.

— **Signaux de sortie de gare** : Signaux a 2 feux (V, R) places en sortie de gare.

— **Signaux de manoeuvre** : Signaux a 2 feux (RR, R) pour les manoeuvres dans la gare.

— **Detection de presence** : Compteurs d'essieux pour la detection des trains.

— **Commande centralisee** : Poste de commande informatise (PCI) dans la gare de depassement.

11.3 Introduction au Systeme ERTMS

11.3.1 Contexte et Objectifs

L'**European Rail Traffic Management System** (European Rail Traffic Management System) est un systeme europeen de gestion du trafic ferroviaire developpe dans le cadre de l'interoperabilite des reseaux ferroviaires europeens. Il vise a :

— **Standardiser** la signalisation ferroviaire en Europe

— **Augmenter** la capacite des lignes existantes

— **Ameliorer** la securite des circulations

— **Reduire** les couts d'exploitation et de maintenance

— **Faciliter** la circulation internationale des trains

L'European Rail Traffic Management System est compose de deux sous-systemes :

— L'**European Train Control System** (European Train Control System) : systeme de controle-commande des trains

— La **GSM-R** : systeme de radiocommunication entre le sol et le train

11.3.2 Niveaux de l'ETCS

L'European Train Control System est defini en **3 niveaux** d'equipement, du plus simple au plus sophistique :

ETCS Niveau 1

L'**ETCS Niveau 1** est un systeme de signalisation cabinee qui utilise les **signaux de voie existants** et les **balises** (beacons) au sol pour transmettre les informations au train.

— **Balises** : Transmetteurs de donnees fixes (position, vitesse limite) ou variables (etat des signaux)

— **Euroloop** : Antenne au sol pour la transmission de donnees variables

— **Cabine** : Ecran affichant la vitesse autorisee et la distance a parcourir

Avantages :

— Peu couteux a installer (utilise l'infrastructure existante)

— Compatible avec la signalisation classique

— Ameliore la securite par la signalisation cabinee

Inconvenients :

— Ne supprime pas les signaux de voie

— Capacite limitee par la signalisation existante

ETCS Niveau 2

L'**ETCS Niveau 2** est un systeme **sans signaux de voie**. Les informations sont transmises au train par **radio** (GSM-R) depuis un centre de controle.

— **Pas de signaux de voie** : La signalisation est entierement en cabine.

— **Balises** : Uniquement pour le positionnement (pas pour la signalisation)

— **GSM-R** : Transmission continue des donnees (autorisation de mouvement, vitesse)

— **RBC** (Radio Block Center) : Centre de controle qui gere les cantons et transmet les autorisations

Avantages :

— Suppression des signaux de voie (economies d'entretien)

— Augmentation de la capacite (cantons virtuels, plus courts)

— Flexibilite dans la gestion des circulations

Inconvenients :

— Cout d'installation eleve

— Dependance a la couverture radio

— Complexite du systeme

ETCS Niveau 3

L'**ETCS Niveau 3** est la version la plus avancee, ou les trains se **auto-localisent** et communiquent leur position au RBC. Les cantons sont definis par la **position des trains** et non par des detecteurs au sol.

— **Pas de detection au sol** : Les trains signalent leur position par radio.

— **Cantons virtuels** : Dynamiques, bases sur la position reelle des trains

— **Capacite maximale** : Intervalles minimaux entre trains

— **Optimisation** : Gestion en temps reel du trafic

Avantages :

— Capacite maximale de la ligne

— Pas d'infrastructure de detection au sol

— Optimisation dynamique du trafic

Inconvenients :

— Complexite maximale

— Exigences de securite tres elevees pour la localisation

— Cout d'installation tres eleve

11.3.3 Comparaison des Niveaux ETCS

TABLE 11.2 – Comparaison des niveaux ETCS

Caracteristique	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Signaux de voie	Oui	Non	Non
Balises	Oui (donnees)	Oui (position)	Oui (position)
Radio GSM-R	Non	Oui	Oui
Detection au sol	Oui	Oui	Non
Cantons	Fixes	Fixes	Virtuels
Capacite	Moyenne	Elevee	Maximale
Cout d'installation	Faible	Eleve	Tres eleve
Cout d'exploitation	Moyen	Faible	Tres faible

11.3.4 Application de l'ERTMS au Projet

Pour le present projet, compte tenu de la nature de la ligne (voie unique, vitesse 100 km/h, trafic mixte moderé), l'**ETCS Niveau 1** est recommandé comme solution d'evolution future. Ce niveau offre :

— Une **amélioration de la securité** par la signalisation cabinée

— Une **compatibilité** avec le BAVU installe initialement

— Un **cout d'installation** maitrise

— Une **préparation** a une éventuelle évolution vers le Niveau 2

L'installation de l'European Rail Traffic Management System Niveau 1 comprendrait :

— La pose de **balises** le long de la voie (tous les 200–500 m)

— L'équipement des **locomotives** avec le systeme ETCS embarqué

— La mise en place d'un **centre de controle** pour la supervision

— La **formation** du personnel (conducteurs, agents de maintenance)

11.4 Application de la Signalisation sur le Trace du Projet

11.4.1 Implantation des Signaux

Sur le trace du projet (15 km, voie unique), la signalisation est implantee comme suit :

Signaux d'Entree de Gare

Un **signal d'entree de gare** est placé en entree de la gare de depassement (PK 61+050) dans chaque sens de circulation. Ce signal est a 3 feux (V, A, R) et commande par le poste de commande informatise (PCI).

Signaux de Sortie de Gare

Un **signal de sortie de gare** est place en sortie de la gare dans chaque sens. Ce signal est a 2 feux (V, R) et indique si la voie est libre pour le depart.

Signaux de Manoeuvre

Des **signaux de manoeuvre** (2 feux : RR, R) sont places dans la gare pour les operations de changement de voie et de garage.

Signaux de Protection

Des **signaux de protection** sont places en avant des passages a niveau (PK 2+300, PK 10+200, PK 14+000) pour prevenir les conducteurs.

11.4.2 Poste de Commande Informatise (PCI)

La **gare de depassement** est équipée d'un **Poste de Commande Informatise (PCI)** qui assure :

— La **commande** des aiguillages

— La **gestion** des signaux

— La **detection** de l'occupation des voies

— La **communication** avec les trains (par radio)

— La **supervision** de l'ensemble de la ligne

Le PCI est installe dans un batiment de la gare et est alimente par une source electrique de secours (groupe electrogene).

11.5 Conclusion

Ce chapitre a presente la signalisation ferroviaire du projet. Le systeme de cantonnement retenu est le **Block Automatique a Voie Unique (BAVU)** avec des signaux lumineux, adapte a la nature de la ligne (voie unique, trafic mixte).

La signalisation assure la securite des circulations par la separation des trains en cantons, la gestion des priorites dans la gare de depassement, et la protection des zones dangereuses (passages a niveau, aiguillages).

L'introduction au systeme **European Rail Traffic Management System** a permis de presenter les perspectives d'evolution de la signalisation vers des systemes plus modernes et plus performants. L'**ETCS Niveau 1** est recommandé comme solution d'evolution future, offrant une amelioration de la securite par la signalisation cabinee tout en conservant une compatibilite avec l'infrastructure existante.

La signalisation ferroviaire, en combinaison avec la gare de depassement etudiee au Chapitre XI, constitue le systeme d'exploitation complet de la ligne, garantissant la securite et l'efficacite des circulations.

Chapitre XII

Impact environnemental et mesures d'atténuation

Introduction

L'évaluation des impacts environnementaux est une étape très importante dans la conception de tout projet d'infrastructure. Cette évaluation cherche à identifier et à analyser les effets directs et indirects que le projet peut avoir sur l'environnement, à court, moyen et long terme.

De nos jours, les écosystèmes se dégradent de plus en plus et les gens sont de plus en plus conscients des problèmes environnementaux dans le monde entier. C'est pourquoi l'étude d'impact sur l'environnement est devenue un outil indispensable pour prendre des décisions éclairées. Elle permet d'intégrer les considérérations environnementales dès le début du projet pour éviter, réduire ou compenser les effets négatifs, tout en mettant en valeur les effets positifs.

Les concepteurs et les maîtres d'ouvrage ont la responsabilité de s'assurer que la construction et l'exploitation des infrastructures ne nuisent pas à l'environnement et suivent les principes du développement durable.

12.1 Cadre réglementaire

En vue de s'assurer que le projet soit réalisé de façon écologique, c'est-à-dire qu'il s'inscrive dans le cadre du développement durable, il faut s'assurer que le projet se conforme à la législation qui lui est applicable en Algérie. Ces lois visent à prévenir et minimiser l'impact du projet sur l'environnement et ses ressources.

Voici donc les principaux éléments de législation applicables à ce projet :

12.2 Description de l'état initial de la zone du projet

La région d'étude se situe à l'Est algérien, sur le territoire de la wilaya de Guelma. Elle est limitée par la wilaya d'El Tarf au nord et au nord-est, par la Wilaya de SouK Ahras au sud et par la ville de Guelma à l'Ouest. Le tronçon traverse la commune de Bouchegouf

TABLE 12.1 – Cadre réglementaire et législatif applicable au projet

Rubrique	**Références légales et réglementaires**
Protection de l'environnement et développement durable	• Loi n° 83-03 du 05 février 1983 relative à la protection de l'environnement. • Loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
Étude d'impact sur l'environnement	• Décret n° 87-91 du 21 avril 1987 relatif à l'étude d'impact d'aménagement du territoire. • Décret exécutif n° 90-78 du 27 février 1990 relatif aux études d'impact sur l'environnement.
Faune et flore	• Loi n° 91-20 du 2 décembre 1991, modifiant et complétant la loi n° 84-12 du 23 juin 1984 portant régime général des forêts. • Ordonnance n° 06-05 du 19 Joumada Ethania 1427 correspondant au 15 juillet 2006 relative à la protection et à la préservation de certaines espèces animales menacées de disparition.
Patrimoine culturel et sites archéologiques	• Loi n° 98-04 du 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel dans ses dispositions relatives aux territoires archéologiques et historiques.
Hygiène et sécurité	• Décret exécutif n° 02-247 du 3 chaouel 1423 correspondant au 7 décembre 2002 relatif aux conditions d'organisation de l'instruction, de l'information et de la formation des travailleurs dans le domaine de la prévention des risques professionnels. • Décret exécutif n° 05-08 du 8 janvier 2005 relatif aux prescriptions particulières applicables aux substances, produits et préparations dangereuses.
Émission atmosphérique	• Décret exécutif n° 06-138 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle. • Décret exécutif n° 03-410 du 5 novembre 2003 fixant les seuils limites des émissions des fumées, des gaz toxiques et des bruits par les véhicules automobiles.

12.2.1 Environnement physique :

Relief :

Région, comprise dans l'étage bioclimatique subhumide, englobe toute la partie médiane du Nord vers le Sud du territoire de la Wilaya. Cette région se caractérise aussi par une importante couverture forestière au Nord et à l'Est, par contre, la partie Sud souffre de dégradations répétées d'où une absence de couverture forestière fournie en dépit du caractère montagneux de cette sous-région, d'où une grande vulnérabilité

Climat

La région de l'étude est caractérisée par un climat méditerrané avec un été chaud et un hiver froid, la zone d'étude traversée par le tracé de la ligne Minière se caractérise par un climat humide à subhumide.

Réseau hydrographique

La Seybouse a déposé sur ses deux rives des couches importantes d'alluvion quaternaire. La Seybouse près de Drean décrit des méandres avec captures et bras morts. Ainsi l'actuel khelidj du Khamissa serait un ancien bras de la Seybouse que lors des grandes crues redevient fonctionnel. L'oued Seybouse finit son parcours dans la plaine littorale d'Annaba pour se jeter à la Méditerranée

12.2.2 Environnement humain et socio-économique :

Industrie

Le tissu industriel est peu développé mais susceptible de connaître un développement sur les filières économiques sus – indiquées, il s'active autour de :Une unité de céramique ;Une unité cycle et motocycle ; L'ENA sucre - société publique , Une carrière de marbre de MAHOUNA ; Des ressources sylvestres dont l'exploitation doivent être rationalisées et les activités de transformation du bois qui doivent être développées.

Infrastructure de base

La wilaya de Guelma dispose d'un réseau routier important et diversifié d'une longueur de 2205,54 Km dont 299,20 Km de R.N tandis que le réseau ferroviaire est de 37 Km seulement qui sont en service, cet axe relie Guelma à Bouchegouf et Ain Ben Beidha (Boukamouza).

Tourisme

La Wilaya de Guelma recèle d'importantes potentialités touristiques, elle est célébre pour ses sites et monulents naturels et historiques , notamment : la grande cascade de Hammam Debagh, forêts de Mahouna et Béni Salah ; les grottes de Taya (Bouhamdane) et le théâtre Romain et musée antique à Guelma ;

12.2.3 Environnement biologique :

Faune

Le site a une grande biodiversité animale avec plusieurs oiseaux (glaureole a collier, échasse blanche, cigogne blanche, aigrette garzette, bécasselle variable). Il y a également des espèces aquatiques qui sont présentes au niveau de cette zone comme l'anguille d'Europe, une espèce en voie de disparition, Aphanius fasciatus, une espèce protégée et également d'autres poissons endémiques comme Pseudophoxinus et Barbus.

Flore

La zone d'étude est définie par une diversité de végétation formée de forêts et de maquis arbustifs. Les forêts se composent majoritairement des espèces suivantes : le Chêne-liège , le Chêne zéen, le Chêne vert, le Pin d'Alep, le Pin pignon ainsi que le Cyprès et l'Eucalyptus. Le sous-bois et les maquis arbustifs sont formés par entre autres, le Oléastre le Lentisque, le Calycotome, le Ciste, le Diss (Ampelodesmos tenax), l'Asphodèle, la Bruyère.

12.3 Évaluation de l'impact du projet

12.3.1 Les impacts positifs

Le projet de dédoublement de la voie ferroviaire de la ligne minière ouvre la voie à une dynamique de développement pour la région, avec des perspectives de renforcement à plusieurs niveaux. Il génère des impacts directs et indirects. Il s'agit notamment de :

— Des retombées pour l'économie régionale liées àl'injection d'un montant de travaux important et des effets d'entraînement pour les entreprises de du génie civil, de l'industrie et des services, de ce fait, des créations ou des maintiens d'emplois.

— L'impact potentiel du projet pour les activités économiques minières est lié à la durée des travaux, dont les effets se feront plus ressentis dans le secteur minier (transport)

— Le projet permettra d'une part de faciliter les déplacements, vers les pôles d'activités minières et d'autres industries et d'autre part de les relier entre eux.

— La réduction du trafic routier, diminution de la pollution atmosphérique et réduction des risques d'accidents.

12.3.2 Les impacts négatifs et les mesures d'atténuation envisagées

Le projet est susceptible d'engendrer certaines incidences négatives sur l'environnement et le milieu humain. Ces impacts, généralement temporaires ou localisés, sont principalement liés aux travaux de construction et aux activités associées. On présente dans cette section les principaux impacts ainsi que les mesures d'atténuation envisageables.

TABLE 12.3 – Synthèse des impacts environnementaux et solutions d'atténuation

Impact	Solution d'atténuation
Flore — Le tracé proposé est positionné en marge de la zone forestière de la wilaya de Guelma, dans une réserve naturelle qui abrite l'une des espèces faunistiques les plus rares. — La pollution de l'air et de l'eau peut avoir un impact sur les végétaux se trouvant aux abords du chantier.	— Compte tenu de la présence d'espèces remarquables comme les pins d'Alep, cyprès et les chênes de liège à proximité du projet, les emprises du chantier devront être limitées aux zones strictement nécessaires dans cette section du tracé. — Il est nécessaire de réaliser les travaux en dehors des périodes de nidification et d'hibernation. — Limitation des émissions de poussières particulièrement sur les zones à proximité de cultures sensibles.
Faune — Les interventions liées au projet peuvent conduire à la dégradation de milieux forestiers, prairiaux et humides, essentiels à de nombreuses espèces animales. — Les travaux de longue durée à proximité des milieux naturels, notamment forestiers, sont susceptibles de provoquer un dérangement de la faune et une réduction de la fréquentation de ces espaces par certaines espèces.	

Impact		Solution d'atténuation
Sol et sous-sol	— Les travaux peuvent générer des effets de tassement, de modification de la structure des premières couches géologiques du sol, de stabilité du sol (via les déblais et les remblais), de pollution, ... — Les besoins du projet en matériaux de construction peuvent entraîner une pression accrue sur les ressources naturelles à travers l'exploitation des carrières et des zones d'extraction.	— Le recours autant que possible à des carrières existantes. — Précautions d'usage des substances polluantes, stockage du matériel et des produits potentiellement polluants sur des aires spécifiques imperméables en rétention, à l'écart des zones de ruissellement et des points d'eau. — Gérer efficacement les déchets, les rejets liquides et les eaux usées. — Les véhicules et matériels de chantier devront être aux normes (échappement et taux de pollution) et des contrôles réguliers seront effectués.
Hydrologique et hydrogéologique	— Les travaux de construction peuvent entraîner une dégradation de la qualité des eaux de surface par l'apport de sédiments issus du ruissellement ainsi que par d'éventuels rejets accidentels de produits chimiques, d'huiles ou de carburants. — Plusieurs captages d'eaux ont été recensés dans l'aire d'étude (étendue de 1000m) d'après le levé topo. — Les travaux de construction peuvent modifier les niveaux des nappes phréatiques, affectant ainsi les puits et les sources locales. — La réalisation d'une infrastructure de transport linéaire intercepte sur son parcours une multitude de bassins versants, plus ou moins importants.	

Suite à la page suivante...

Suite du tableau de la page précédente

Impact	Solution d'atténuation
Qualité de l'air — Les activités de terrassement et la circulation des engins de chantier génèrent des émissions de poussières et de particules en suspension, ainsi que des rejets liés aux moteurs thermiques, pouvant altérer temporairement la qualité de l'air.	

Impact	Solution d'atténuation
Milieux agricoles — Le dépôt de poussières sur les terres agricoles. — La réalisation de voies ferrées entraîne une réduction des superficies agricoles disponibles pour les activités de culture.	— Le travail de nuit et les jours fériés sont interdits, sans accord préalable du maître d'ouvrage et des administrations concernées. — Les propriétaires, dont le bâti et/ou les biens fonciers se trouvent inclus dans les emprises définitives, sont indemnisés dans les conditions prévues par le code de l'expropriation.
Milieux humains — La génération de nuisances sonores liées aux démolitions, aux engins de chantier et aux travaux de creusement et de construction. — La perturbation des déplacements urbains et de l'accès des riverains. — L'expropriation de certaines surfaces bâties situées dans l'emprise du projet.	

12.4 Conclusion

L'évaluation des impacts environnementaux sur le projet de dédoublement de la voie ferrée de la ligne minière a permis d'apprécier les interactions possibles entre les opérations de construction et les divers milieux récepteurs. Il ressort que, comme tout projet d'infrastructure, il a des impacts positifs très marqués notamment au niveau économique, structuration des échanges et amélioration des conditions de transport. Cependant, ce projet donnera aussi des impacts négatifs qui seront principalement liés aux

travaux de chantier et qui concerneront les milieux physiques, biologiques et humains. Ces impacts, qu'ils soient temporaires ou permanents, devront être atténués afin d'assurer une meilleure intégration du projet dans son environnement.

Chapitre XIII

DEVIS ESTIMATIF QUANTITATIF

13.1 Introduction

Ce chapitre présente le devis estimatif et quantitatif global des travaux de modernisation et de rectification du tronçon ferroviaire. Les montants sont exprimés en Dinars Algériens (DZD).

13.2 Tableau du devis estimatif et quantitatif

N°	Désignation	U	Quantité	Prix Unitaire	Montant
1 — INSTALLATION DU CHANTIER ET ETUDE D'EXECUTION					
1.01	Amené du matériel et installation général du chantier	f	1	60 000 000,00	60 000 000,00
1.02	Approbation de l'ensemble des plans d'installation	F	1	6 976 694,69	6 976 694,69
1.03	Aménagement de la base vie et son équipement VRD, clôture, branchement et mise en place des réseaux d'alimentation et distribution en électricité et eau réseau d'évacuation eau usées	F	1	27 906 778,76	27 906 778,76
1.04	Baraquement pour bureaux y compris équipement	F	1	27 906 778,76	27 906 778,76
1.05	Amené du matériel et équipement	F	1	48 836 862,84	48 836 862,84
1.06	Ateliers et magasins y compris équipement	F	1	13 953 389,38	13 953 389,38
1.07	Installation du centrale à béton	F	1	13 953 389,38	13 953 389,38
1.08	Repli du matériel et installation général du chantier	F	1	4 360 434,18	4 360 434,18
1.09	Repliement du laboratoire de chantier	F	1	4 360 434,18	4 360 434,18
1.10	Dépose caténaire	Km	20,00	926 843,73	18 536 874,60
2 — TERRASSEMENT					

N°	Désignation	U	Quantité	Prix Unitaire	Montant
2.01	Décapage de la terre végétale sur épaisseur de 0.3cm	M3	85 100,00	527,00	44 847 700,00
2.02	Déblais en terrain meuble et mise en remblai	M3	4 564 546,00	1 000,00	4 564 546 000,00
2.03	Déblais en terrain meuble et mise en dépôt	M3	3 867 948,60	1 000,00	3 867 948 600,00
2.04	Déblais en terrain rocheux et mise en dépôt	M3	1 204 234,00	3 500,00	4 214 819 000,00
2.05	Remblai d'apport en matérieux sélectionné	M3	555 125,60	1 100,00	610 638 160,00
2.06	Evacuation des terres en excès à la décharge publique	M3	3 145 000,00	363,00	1 141 635 000,00
2.07	F/Mise en œuvre de la couche de forme 0.5 cm ép.	M3	71 000,00	1 400,00	99 400 000,00
2.08	F/Mise en œuvre de la couche de fondation 0.15 cm ép.	M3	20 100,00	3 375,00	67 837 500,00
2.09	F/Mise en œuvre de la couche de S/ballast 0.2 cm ép.	M3	25 800,00	6 000,00	154 800 000,00
2.10	F/Mise en œuvre de la couche de ballast 0.3 cm ép.	M4	19 800,00	6 500,00	128 700 000,00
3 — DRAINAGE ET ASSAINISSEMENT (DALOTS)					
3.01	01-DALOTS TYPE : 4,00 x 4,00	F	1,00	1 164 000 000,00	1 164 000 000,00
3.02	02-DALOTS TYPE : 1.50x1.00	F	3,00	129 088 100,00	387 264 300,00
3.03	03-DALOTS TYPE : 2,00 x 1,50	F	1,00	65 871 000,00	65 871 000,00
4 — OUVRAGES D'ART					
4.01	PASSAGE SUPERIEUR PK 54+337	F	1,00	495 000 000,00	495 000 000,00
4.02	PASSAGE SUPERIEUR PK 56+487	F	1,00	382 500 000,00	382 500 000,00
4.03	PASSAGE SUPERIEUR PK 57+575	F	1,00	1 650 000 000,00	1 650 000 000,00
4.04	PASSAGE SUPERIEUR PK 58+850	F	1,00	3 300 000 000,00	3 300 000 000,00
4.05	PASSAGE SUPERIEUR PK 60+100	F	1,00	3 300 000 000,00	3 300 000 000,00
5 — TRAVAUX DE VOIE					

N°	Désignation	U	Quantité	Prix Unitaire	Montant
5.01	Fourniture des rails neufs UIC 60	T	2 648,00	330 000,00	873 840 000,00
5.03	Fourniture des traverses bi-bloc en béton armé (VAX U31)	U	33 320,00	10 000,00	333 200 000,00
5.05	Fourniture des attaches	U	66 640,00	1 400,00	93 296 000,00
5.06	Fourniture d'un appareil simple type UIC 60 E1 500 1/12 DD	U	6,00	26 000 000,00	156 000 000,00
5.07	Fourniture d'un appareil simple type UIC 60 E1 500 1/12 DG	U	6,00	26 000 000,00	156 000 000,00
5.08	Soudure aluminothermique	U	1 100,00	22 451,05	24 696 155,00
6 — TRAVAUX DE DEPLACEMENT DES CONTRAINTES RESEAUX					
6.01	Déplacement des lignes aériennes et canalisation, câbles et ouvrages souterrains	U	1	50 000 000,00	50 000 000,00
				Total Hors Taxes (DZD)	**27 553 631 051,79**
				TVA 19% (DZD)	**5 235 189 899,84**
				TOTAL EN TTC (DZD)	**32 788 820 951,63**

13.3 Arrêté du présent devis

Le présent devis estimatif et quantitatif est arrêté à la somme toutes taxes comprises (TTC) de : **Trente-deux milliards sept cent quatre-vingt-huit millions huit cent vingt mille neuf cent cinquante et un Dinars Algériens et soixante-trois centimes (32 788 820 951,63 DZD)**.

Chapitre XIV

Conclusion Générale et Perspectives

L'étude d'Avant-Projet Détaillé (APD) a constitué une étape charnière de notre travail, nous permettant d'explorer en profondeur les éléments structurels de la voie ferrée à travers la planification rigoureuse du tracé, la conception technique des infrastructures et le dimensionnement précis des installations. Cette démarche globale a intégré avec exigence les contraintes environnementales, économiques et topographiques, assurant ainsi la viabilité, la sécurité et la durabilité du projet ferroviaire proposé.

Sur le plan méthodologique, cette étude a consolidé notre expertise en analyse de données complexes et en ingénierie numérique. La maîtrise et l'exploitation d'outils professionnels de modélisation et de simulation de pointe, tels qu'AutoCAD et Covadis, ont été indispensables pour transcrire les exigences théoriques en solutions graphiques et géométriques concrètes.

En définitive, ce projet nous a permis d'allier les concepts académiques aux réalités techniques du terrain. Il a développé notre capacité à piloter des études ferroviaires complexes, depuis la conception géométrique fine jusqu'à l'évaluation de leur impact territorial, ouvrant ainsi la voie à des compétences solides en ingénierie des transports.

Annexe A

Listing géométrie

Axe En Plan

Axe tabulé : Axe en plan Bouchegouf - DREA TRONCON N°01 SUR 10 KM
Courbe de profil : Projet Dedoublement et rectification du tracé de la lige miniere

Elts Caractéristiques				Points de Contacts		
Nom	Paramètres		Longueur	Abscisse	X	Y
Droite 1	Gisement	187.64gr	75.070	53675.000	385286.607	4038603.258
Arc 1	Rayon	200.000 m	450.000	53750.070	385301.089	4038529.598
	Centre X	385497.332 m				
	Centre Y	4038568.181 m				
Droite 2	Gisement	44.40gr	68.390	54200.070	385650.628	4038439.726
Clothoïde 1	Paramètre	-189.737	90.000	54268.461	385694.553	4038492.145
Arc 2	Rayon	-400.000 m	624.724	54358.461	385754.869	4038558.875
	Centre X	386030.680 m				
	Centre Y	4038269.171 m				
Clothoïde 2	Paramètre	189.737	90.000	54983.184	386317.893	4038547.574
Droite 3	Gisement	158.15gr	320.278	55073.184	386375.483	4038478.478
Clothoïde 3	Paramètre	204.939	70.000	55393.463	386571.173	4038224.936
Arc 3	Rayon	600.000 m	386.748	55463.463	386615.005	4038170.372
	Centre X	387067.803 m				
	Centre Y	4038564.039 m				
Clothoïde 4	Paramètre	-204.939	70.000	55850.211	386942.399	4037977.291
Droite 4	Gisement	109.69gr	164.685	55920.211	387011.360	4037965.335
Clothoïde 5	Paramètre	-200.000	50.000	56084.896	387174.141	4037940.362
Arc 4	Rayon	-800.000 m	386.388	56134.896	387223.479	4037932.266
	Centre X	387077.520 m				
	Centre Y	4037145.694 m				
Clothoïde 6	Paramètre	200.000	50.000	56521.284	387572.086	4037774.506
Droite 5	Gisement	144.42gr	171.734	56571.284	387610.733	4037742.785
Clothoïde 7	Paramètre	212.132	50.000	56743.018	387742.335	4037632.451
Arc 5	Rayon	900.000 m	902.374	56793.018	387780.945	4037600.685
	Centre X	388339.785 m				
	Centre Y	4038306.162 m				
Clothoïde 8	Paramètre	-212.132	50.000	57695.392	388633.726	4037455.516
Droite 6	Gisement	77.05gr	1052.879	57745.392	388680.672	4037472.718
Clothoïde 9	Paramètre	-189.737	90.000	58798.272	389665.880	4037844.096
Arc 6	Rayon	-400.000 m	375.364	58888.272	389751.178	4037872.646
	Centre X	389849.358 m				
	Centre Y	4037484.883 m				
Clothoïde 10	Paramètre	189.737	90.000	59263.636	390104.104	4037793.272
Droite 7	Gisement	151.12gr	396.594	59353.636	390168.965	4037730.951
Clothoïde 11	Paramètre	-194.422	90.000	59750.229	390444.441	4037445.645
Arc 7	Rayon	-420.000 m	1113.360	59840.229	390504.573	4037378.743
	Centre X	390172.964 m				
	Centre Y	4037120.993 m				
Clothoïde 12	Paramètre	194.422	90.000	60953.589	390001.960	4036737.382
Droite 8	Gisement	333.52gr	376.810	61043.589	389922.623	4036779.777
Clothoïde 13	Paramètre	200.682	70.000	61420.399	389596.839	4036969.120
Arc 8	Rayon	575.334 m	1818.907	61490.399	389535.628	4037003.055
	Centre X	389277.304 m				
	Centre Y	4036488.974 m				
Clothoïde 14	Paramètre	-200.682	70.000	63309.307	389029.255	4035969.859
Droite 9	Gisement	124.50gr	406.508	63379.307	389093.576	4035942.269
Clothoïde 15	Paramètre	200.000	80.000	63785.815	389470.339	4035789.631
Arc 9	Rayon	500.000 m	216.945	63865.815	389545.238	4035761.587
	Centre X	389695.348 m				
	Centre Y	4036238.522 m				
Clothoïde 16	Paramètre	-200.000	80.000	64082.760	389759.653	4035742.675
Droite 10	Gisement	86.70gr	123.383	64162.760	389838.305	4035757.174
	64286.143	389959.004	4035782.770			
Longueur totale de l'axe 10 611.143 mètre(s)						

Profil En Long Projet

Axe tabulé :	**Profil En Long Bouchegouf - DREA TRONCON N°01 SUR 10 KM**
Courbe de profil :	**Projet Dédoublement et rectification du tracé de la lige minière**

Elts Caractéristiques				Points de Contacts	
Nom	Pente / Rayon		Longueur	Abscisse	Altitude
Pente 1	Pente	1.80 %	1973.166	53675.000	93.347
Cercle 1	Rayon	-26000.000 m	51.964	55648.166	128.882
	Sommet Absc.	56116.328 m			
	Sommet Alt.	133.097 m			
Pente 2	Pente	1.60 %	1368.292	55700.130	129.766
Cercle 2	Rayon	26000.000 m	52.009	57068.423	151.672
	Sommet Absc.	56652.225 m			
	Sommet Alt.	148.341 m			
Pente 3	Pente	1.80 %	1991.056	57120.432	152.557
Cercle 3	Rayon	-26000.000 m	52.009	59111.488	188.417
	Sommet Absc.	59579.695 m			
	Sommet Alt.	192.633 m			
Pente 4	Pente	1.60 %	1491.028	59163.497	189.302
Cercle 4	Rayon	-3500.000 m	56.027	60654.525	213.173
	Sommet Absc.	60710.551 m			
	Sommet Alt.	213.621 m			
Pente 5	Pente	-0.00 %	3575.591	60710.552	213.621
				64286.143	213.621
Longueur totale de l'axe 10611.143 mètre(s)					
Longueur développée totale de l'axe 10612.177 mètre(s)					

Annexe B

Tracé combiné

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

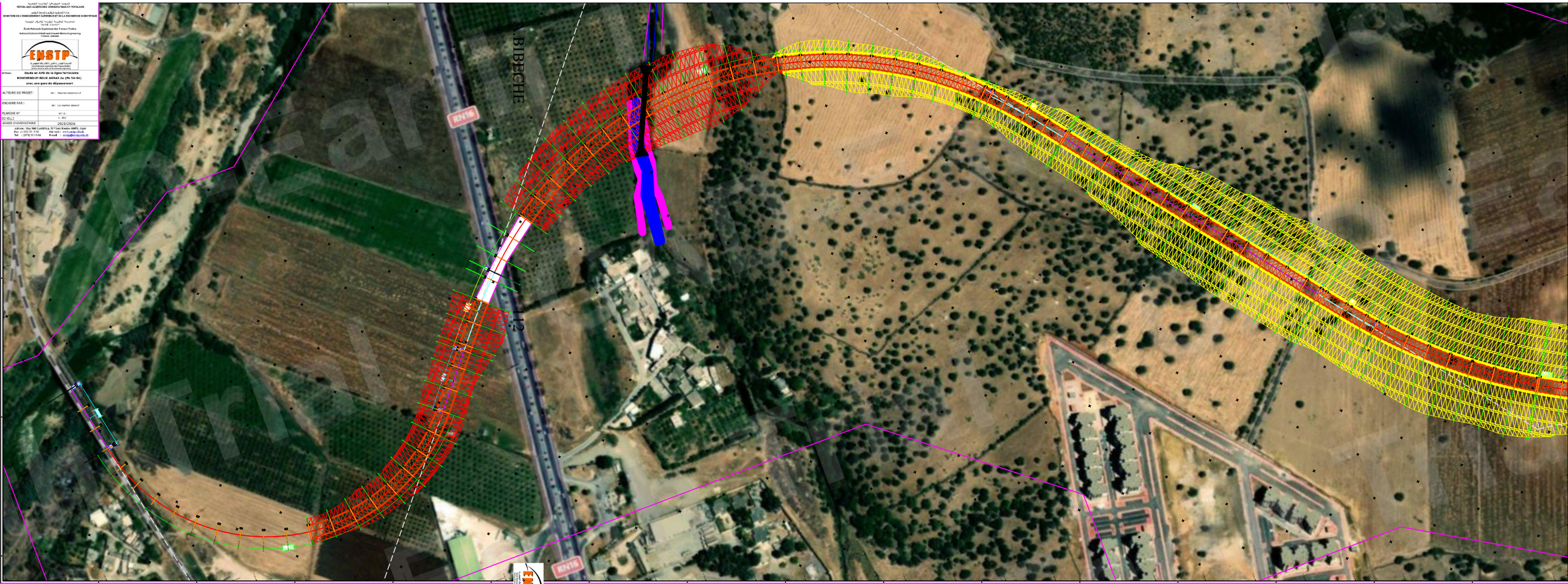
École Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Built and General Works Engineering
الخروبة، الجزائر

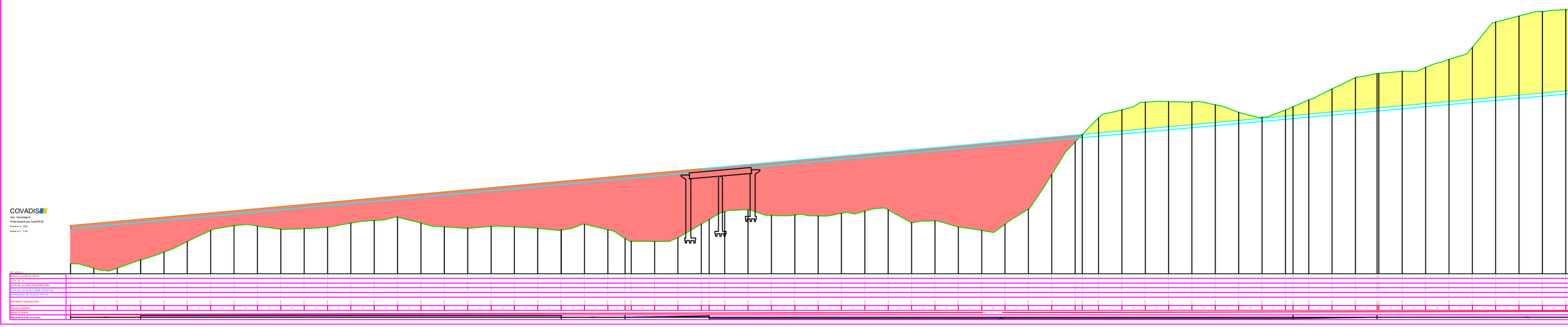
ENSTP

THEME : **Etude en APD de la ligne ferroviaire BOUCHEGROUF-SIDI AMAR du (PK 54-56) avec une gare de dépassement**

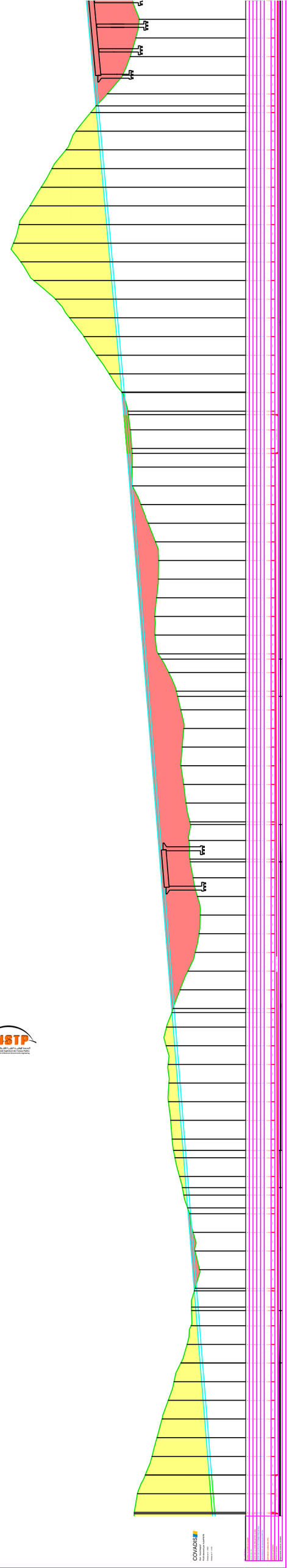
AUTEURS DE PROJET :	Mr : Yakoche abderrezzak F
ENCADRE PAR :	Mr : Ouis mokhtar Jaward
PLANCHE N°	N°1 /1
ECHELLE	1 : 400
ANNEE UNIVERSITAIRE	2025/2026

Adresse : Rue Nidi Cornili B.p. 32 Vieux Kouba -16097- Alger
Fax : (+ 213) 70 71 91 81 Site Web : www.ensttp.edu.dz
Tel : (213) 70 13 04 E-mail : enstp@enstp.edu.dz









A.BIBECHE

ENSTP

ETUDE :

Etude en APD de la Cote Territoriale

BOUCHEGOUF-SOUK AHRAS d.v (PK 0+ 641)

avec voie pare de dépassement

AUTEURS DU PROJET:

LOCALISATION :

PLAN DE NIF

ECHELLE

ANNEE UNIVERSITAIRE

2025/2026

COVADIS

Rel : Vouchagez

Profil dessiné par AutoPISTE

Echelle en X : 1/500

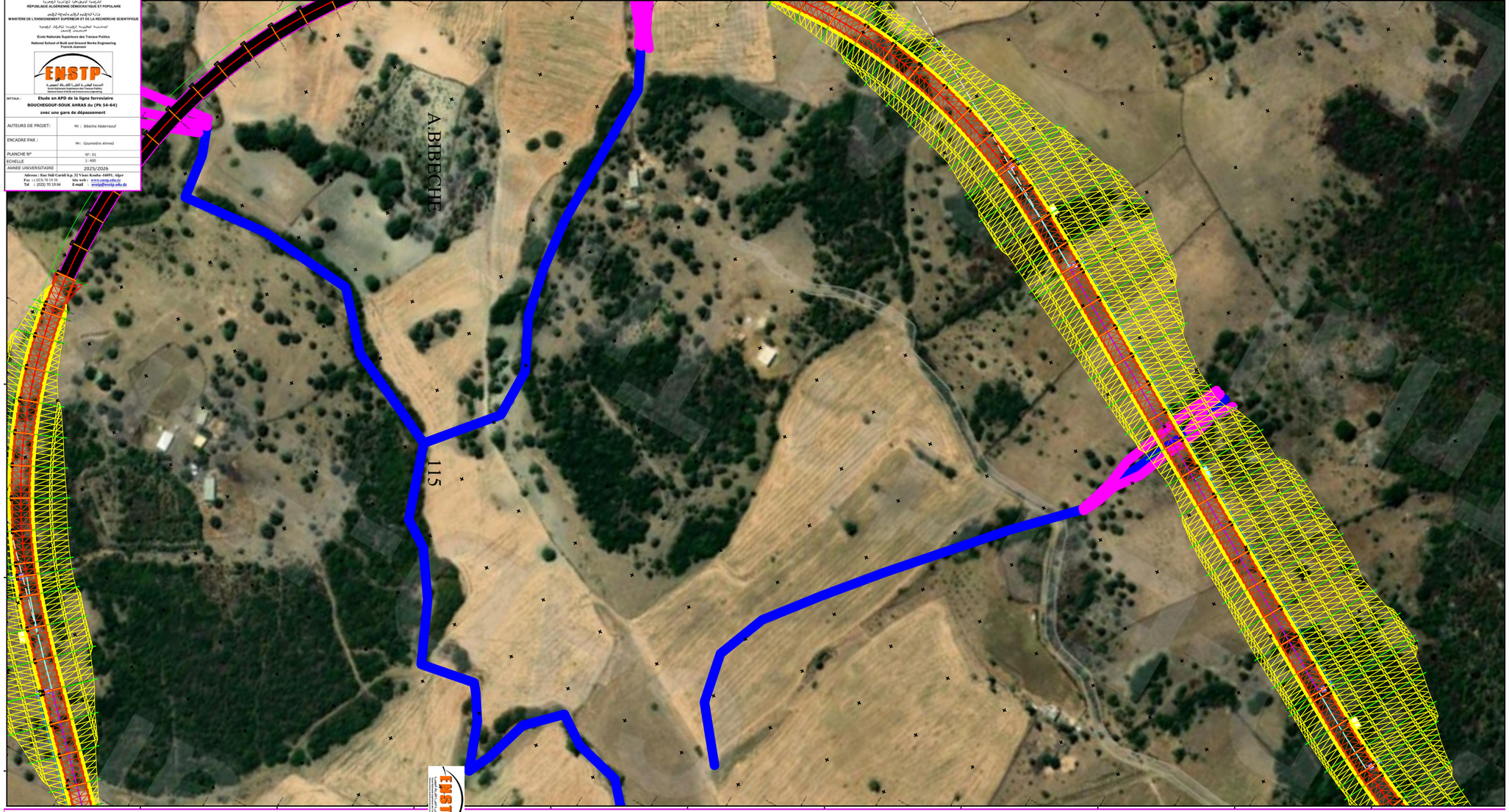
Echelle en Y : 1/100

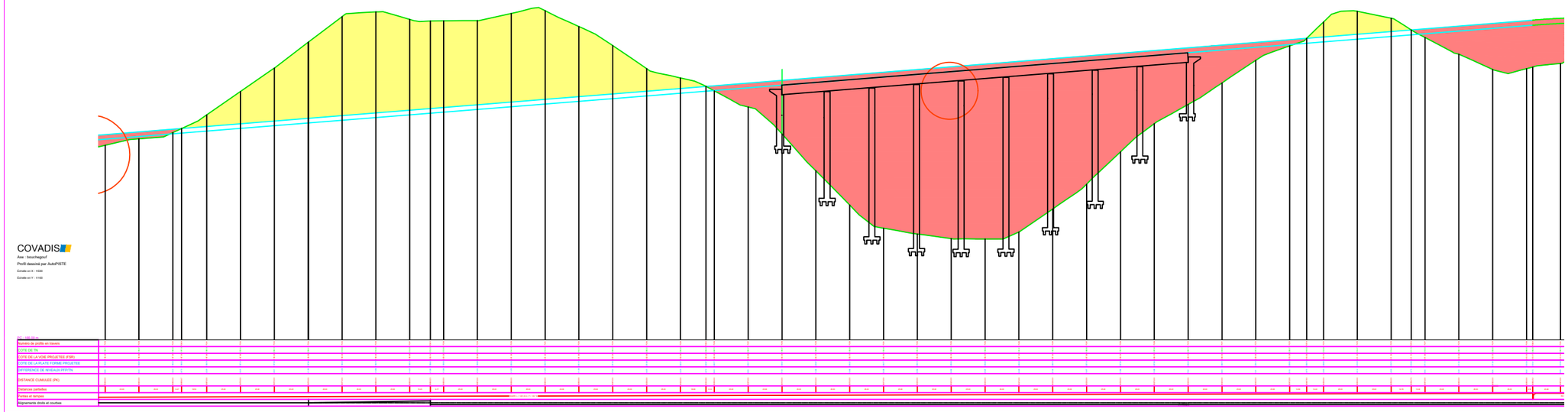
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
"المعهد الوطني"
École Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Built and Ground Works Engineering
Francis Jeanson

INTITULE : **Etude en APD de la ligne ferroviaire BOUCHEGOUF-SOUK AHRAS du (Pk 54-64) avec une gare de dépassement**

AUTEURS DE PROJET:	Mr : Bibeche Abderraouf
ENCADRE PAR :	Mr: Goumedne Ahmed
PLANCHE N°	N°: 01
ECHELLE	1 /400
ANNEE UNIVERSITAIRE	2025/2026

Adresse : Rue 168 Cavidi b.p. 32 Vieux Kouba -16051- Alger
Fax : (+213) 70 19 13 Site web : www.ensti.dz
Tél : (+213) 70 19 04 E-mail : ensp@ensp.edu.dz





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية للأشغال العمومية
École Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Built and Ground Works Engineering
Francis Jeanson
ENSTP

INTITULE : **Etude en APD de la ligne ferroviaire BOUCHEGOUF-SOUK AHRAS du (Pk 54-64) avec une gare de dépassement**

AUTEURS DE PROJET:	Mr : Bibeche Abderraouf
ENCADRE PAR :	Mr: Goumeithe Ahmed
PLANCHE N°	N°: 01
ECHELLE	1: 400
ANNEE UNIVERSITAIRE	2025/2026

Adresse : Rue 168 Cavidi b.p. 32 Vieux Kouba -16051- Alger
Fax : (023) 70 19 33 Site web : www.enstp.edu.dz
Tél : (023) 70 19 04 E-mail : enstp@enstp.edu.dz

A.BIBECHE

116

ENSTP

COVADIS

Axe : bouchegouf

Profil dessiné par AutoPISTE

Echelle en X : 1/400

Echelle en Y : 1/100

Valeurs de profils en travers	
COTE DE TN	
COTE DE LA VOIE PROJETEE (FSR)	
COTE DE LA PLATE FORME PROJETEE	
DIFFERENCE DE NIVEAUX PROTN	
DISTANCE CUMULEE (PK)	
Alignements particuliers	
Points et clothoïdes	
Alignements droits et courbes	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
École Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Built and Ground Works Engineering
Francis Jeanson

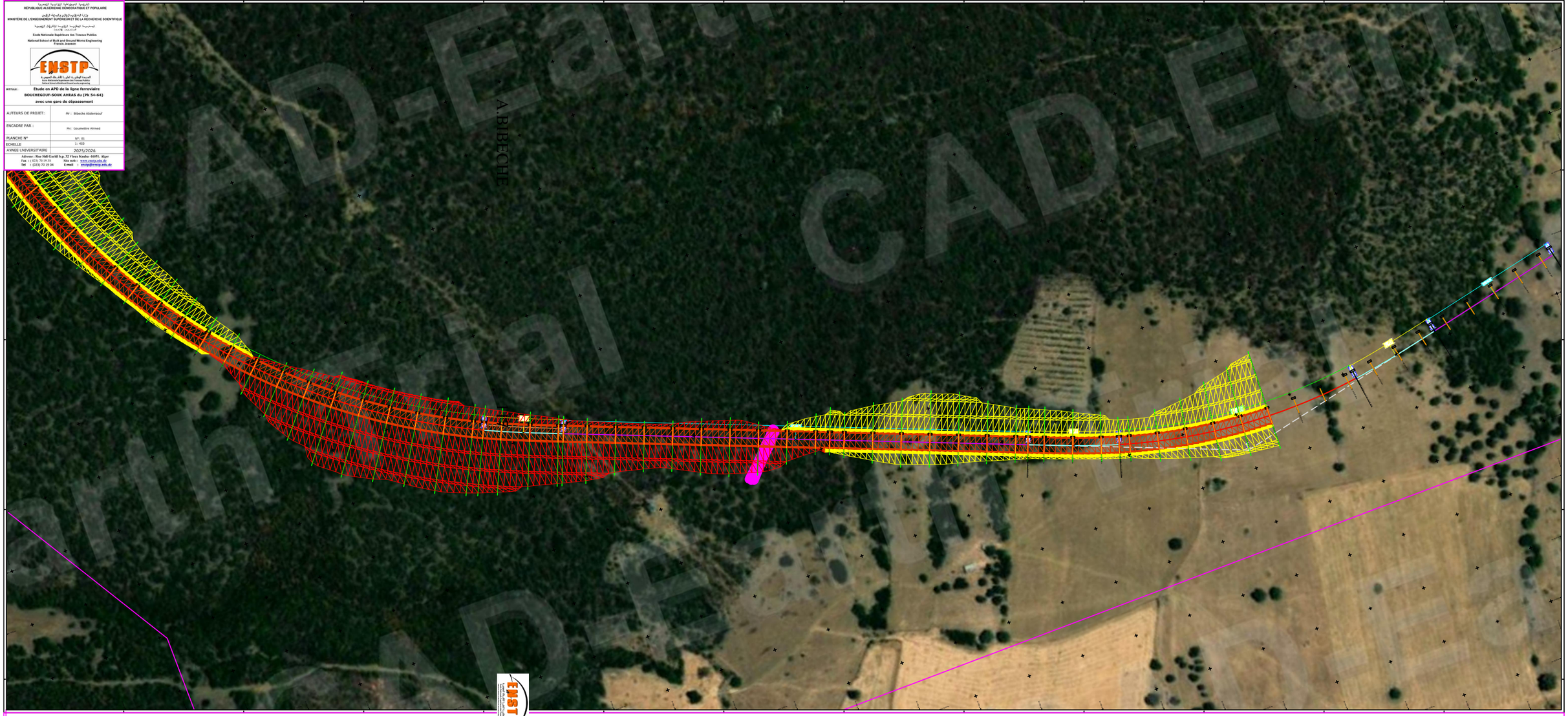
INTITULÉ :

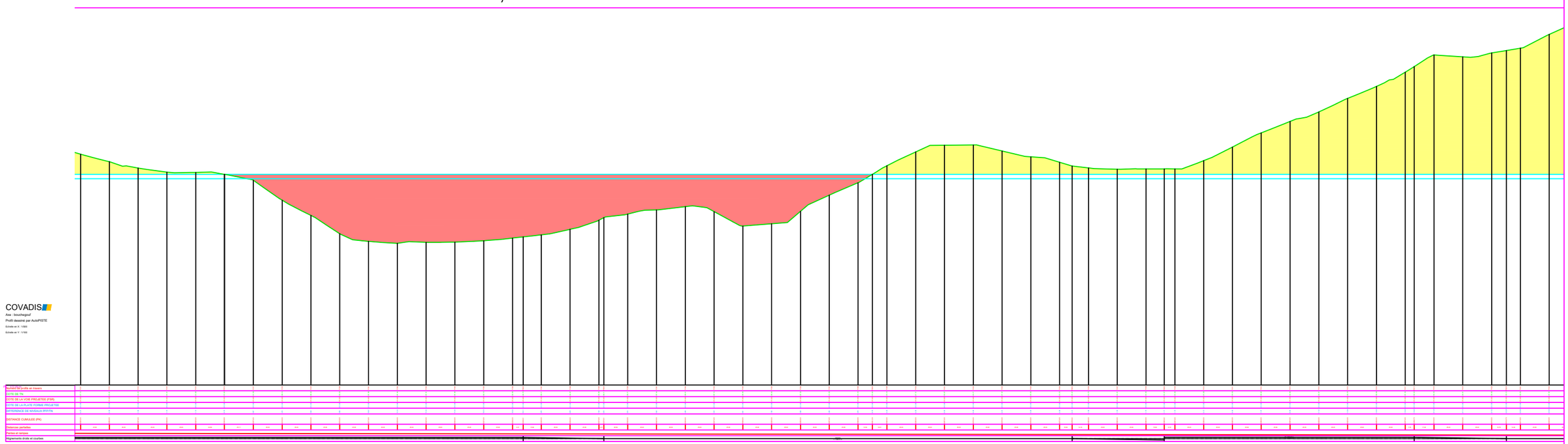
Etude en APD de la ligne ferroviaire
BOUCHEGOUF-SOUK AHRAS du (Pk 54-64)
avec une gare de dépassement

AUTEURS DE PROJET:	Mr : Bibeche Abderraouf
ENCADRE PAR :	Mr: Goumeziene Ahmed
PLANCHE N°	N°: 01
ECHELLE	1: 400
ANNEE UNIVERSITAIRE	2025/2026

Adresse : Rue Sidi Garidi b.p. 32 Vieux Kouba -16051- Alger
Fax : ((021) 70 14 39 Site web : www.enstp.edu.dz
Tel : (021) 70 19 04 E-mail : ensp@ensp.edu.dz

A.BIBECHE





Annexe C

Cubature

Cubatures Déblai Remblai

Num.	Abscisse	Longueur	Surfaces		Volumes Partiels		Volumes Cumulés	
			Déblai	Remblai	Déblai	Remblai	Déblai	Remblai
P14	54000.000	25.000	0.00	65.61	0.0	1636.1	0.0	1636.1
P15	54025.000	25.000	0.00	59.49	0.0	1476.0	0.0	3112.1
P16	54050.000	25.000	0.00	110.25	0.0	2738.8	0.0	5850.9
P17	54075.000	25.000	0.00	149.88	0.0	3729.0	0.0	9580.0
P18	54100.000	25.000	0.00	170.27	0.0	4250.4	0.0	13830.4
P19	54125.000	25.000	0.00	184.71	0.0	4629.2	0.0	18459.6
P20	54150.000	25.000	0.00	211.35	0.0	5295.2	0.0	23754.8
P21	54175.000	25.000	0.00	246.09	0.0	6157.8	0.0	29912.6
P22	54200.000	12.535	0.00	274.35	0.0	3424.9	0.0	33337.5
P22-1	54200.070	12.500	0.00	274.38	0.0	3429.7	0.0	36767.2
P23	54225.000	24.965	0.00	262.52	0.0	6553.7	0.0	43320.9
P24	54250.000	21.730	0.00	327.18	0.0	7109.8	0.0	50430.7
P24-1	54268.461	12.500	0.00	426.36	0.0	5329.6	0.0	55760.3
P25	54275.000	15.770	0.00	454.86	0.0	7171.2	0.0	62931.4
P26	54300.000	25.000	0.06	505.33	1.5	12609.0	1.5	75540.5
P27	54325.000	25.000	0.00	478.21	0.0	11957.8	1.5	87498.3
P28	54350.000	16.730	0.00	0.00	0.0	0.0	1.5	87498.3
P28-1	54358.461	12.500	0.00	0.00	0.0	0.0	1.5	87498.3
P29	54375.000	20.770	0.00	0.00	0.0	0.0	1.5	87498.3
P30	54400.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	1.5	87498.3
P31	54425.000	25.000	0.00	337.43	0.0	8494.3	1.5	95992.6
P32	54450.000	25.000	0.00	355.73	0.0	8946.4	1.5	104939.0
P33	54475.000	25.000	0.00	413.64	0.0	10434.3	1.5	115373.3
P34	54500.000	25.000	0.00	425.60	0.0	10743.4	1.5	126116.8
P35	54525.000	25.000	0.00	456.47	0.0	11477.5	1.5	137594.3
P36	54550.000	25.000	0.00	490.30	0.0	12347.3	1.5	149941.6
P37	54575.000	25.000	0.00	627.45	0.0	15732.4	1.5	165674.0
P38	54600.000	25.000	0.00	687.72	0.0	17167.3	1.5	182841.3
P39	54625.000	25.000	0.00	789.48	0.0	19615.9	1.5	202457.2
P40	54650.000	25.000	0.00	881.64	0.0	21907.4	1.5	224364.7
P41	54675.000	25.000	0.00	802.22	0.0	19909.4	1.5	244274.0

P42	54700.000	25.000	0.00	568.06	0.0	14115.1	1.5	258389.2
P43	54725.000	25.000	0.00	178.80	0.0	4441.5	1.5	262830.7
P44	54750.000	16.315	7.59	0.78	126.2	12.6	127.7	262843.3
P44-1	54757.631	12.500	43.02	0.00	541.4	0.0	669.1	262843.3
P45	54775.000	21.185	151.25	0.00	3214.7	0.0	3883.8	262843.3

Num.	Abscisse	Longueur	Surfaces		Volumes Partiels		Volumes Cumulés	
			Déblai	Remblai	Déblai	Remblai	Déblai	Remblai
P46	54800.000	25.000	213.02	0.00	5312.4	0.0	9196.2	262843.3
P47	54825.000	25.000	271.39	0.00	6703.1	0.0	15899.4	262843.3
P48	54850.000	25.000	260.38	0.00	6416.1	0.0	22315.5	262843.3
P49	54875.000	25.000	235.15	0.00	5790.0	0.0	28105.5	262843.3
P50	54900.000	25.000	184.54	0.00	4567.3	0.0	32672.8	262843.3
P51	54925.000	25.000	105.66	0.00	2611.3	0.0	35284.1	262843.3
P52	54950.000	25.000	67.67	0.00	1661.2	0.0	36945.3	262843.3
P53	54975.000	16.592	91.53	0.00	1497.6	0.0	38442.9	262843.3
P53-1	54983.184	12.500	109.93	0.00	1356.1	0.0	39799.0	262843.3
P54	55000.000	20.908	149.12	0.00	3088.3	0.0	42887.3	262843.3
P55	55025.000	25.000	240.44	0.00	5966.1	0.0	48853.4	262843.3
P56	55050.000	24.092	323.62	0.00	7773.1	0.0	56626.5	262843.3
P56-1	55073.184	12.500	358.74	0.00	4481.8	0.0	61108.3	262843.3
P57	55075.000	13.408	360.28	0.00	4830.5	0.0	65938.8	262843.3
P58	55100.000	25.000	366.23	0.00	9155.7	0.0	75094.6	262843.3
P59	55125.000	25.000	386.74	0.00	9668.6	0.0	84763.1	262843.3
P60	55150.000	25.000	476.39	0.00	11909.8	0.0	96673.0	262843.3
P61	55175.000	25.000	632.92	0.00	15823.1	0.0	112496.0	262843.3
P62	55200.000	25.000	991.41	0.00	24785.3	0.0	137281.3	262843.3
P63	55225.000	25.000	1161.53	0.00	29038.3	0.0	166319.6	262843.3
P64	55250.000	25.000	1186.97	0.00	29674.2	0.0	195993.8	262843.3
P65	55275.000	25.000	1212.48	0.00	30312.1	0.0	226305.9	262843.3
P66	55300.000	25.000	1276.79	0.00	31919.7	0.0	258225.6	262843.3
P67	55325.000	25.000	1350.59	0.00	33764.8	0.0	291990.5	262843.3
P68	55350.000	25.000	1405.98	0.00	35149.4	0.0	327139.9	262843.3
P69	55375.000	21.731	1454.50	0.00	31608.1	0.0	358748.0	262843.3
P69-1	55393.463	12.500	1429.40	0.00	17867.2	0.0	376615.2	262843.3
P70	55400.000	15.769	1411.48	0.00	22247.1	0.0	398862.2	262843.3
P71	55425.000	25.000	1366.31	0.00	34102.3	0.0	432964.5	262843.3
P72	55450.000	19.231	1372.19	0.00	26323.1	0.0	459287.6	262843.3
P72-1	55463.463	12.500	1387.23	0.00	17293.8	0.0	476581.4	262843.3
P73	55475.000	18.269	1402.75	0.00	25563.8	0.0	502145.2	262843.3
P74	55500.000	25.000	1470.13	0.00	36706.1	0.0	538851.3	262843.3
P75	55525.000	25.000	1601.57	0.00	40154.5	0.0	579005.9	262843.3
P76	55550.000	25.000	1638.07	0.00	41123.9	0.0	620129.7	262843.3
P77	55575.000	25.000	1519.54	0.00	38052.6	0.0	658182.3	262843.3

P78	55600.000	25.000	1486.44	0.00	37042.6	0.0	695224.9	262843.3
P79	55625.000	24.083	1643.84	0.00	39441.9	0.0	734666.9	262843.3
P79-1	55648.166	12.500	1597.99	0.00	19838.8	0.0	754505.6	262843.3
P80	55650.000	13.417	1588.87	0.00	21167.5	0.0	775673.2	262843.3
P81	55675.000	25.000	1446.78	0.00	35786.7	0.0	811459.9	262843.3
P82	55700.000	12.565	1234.34	0.00	15295.2	0.0	826755.1	262843.3
P82-1	55700.130	12.500	1233.13	0.00	15200.7	0.0	841955.8	262843.3
P83	55725.000	24.935	1018.95	0.00	25031.4	0.0	866987.2	262843.3
P84	55750.000	25.000	832.50	0.00	20515.6	0.0	887502.8	262843.3
P85	55775.000	25.000	644.14	0.00	15926.8	0.0	903429.5	262843.3
P86	55800.000	25.000	486.96	0.00	12087.2	0.0	915516.7	262843.3
P87	55825.000	25.000	373.09	0.00	9270.2	0.0	924786.9	262843.3
P88	55850.000	12.606	258.86	0.00	3234.7	0.0	928021.6	262843.3
P88-1	55850.211	12.500	257.76	0.00	3196.4	0.0	931217.9	262843.3
P89	55875.000	24.894	178.97	0.00	4423.1	0.0	935641.0	262843.3
P90	55900.000	22.606	117.31	0.00	2642.7	0.0	938283.7	262843.3
P90-1	55920.211	12.500	80.94	0.00	1011.3	0.0	939295.0	262843.3
P91	55925.000	13.248	78.89	0.00	1045.1	0.0	940340.1	262843.3
P91-1	55946.708	12.500	44.58	0.00	557.3	0.0	940897.4	262843.3
P92	55950.000	14.146	37.76	0.00	534.2	0.0	941431.6	262843.3
P93	55975.000	25.000	8.93	7.18	223.1	179.5	941654.7	263022.8
P94	56000.000	25.000	20.62	1.24	515.5	31.1	942170.3	263053.9
P95	56025.000	25.000	35.92	2.74	897.9	68.4	943068.2	263122.4
P96	56050.000	16.403	62.29	1.23	1021.8	20.2	944090.0	263142.6
P96-1	56057.806	12.500	78.18	0.08	977.2	1.0	945067.2	263143.6

Num.	Abscisse	Longueur	Surfaces		Volumes Partiels		Volumes Cumulés	
			Déblai	Remblai	Déblai	Remblai	Déblai	Remblai
P97	56075.000	13.545	114.41	0.28	1549.7	3.8	946616.9	263147.4
P97-1	56084.896	12.500	125.73	0.03	1572.8	0.3	948189.6	263147.7
P98	56100.000	20.052	148.68	0.00	2996.9	0.0	951186.5	263147.7
P99	56125.000	17.448	193.78	0.00	3420.3	0.0	954606.8	263147.7
P99-1	56134.896	12.500	211.48	0.00	2687.0	0.0	957293.8	263147.7
P100	56150.000	20.052	229.83	0.00	4690.1	0.0	961983.9	263147.7
P101	56175.000	25.000	264.73	0.00	6758.5	0.0	968742.4	263147.7
P102	56200.000	25.000	306.56	0.00	7851.2	0.0	976593.6	263147.7
P103	56225.000	25.000	219.81	0.00	5606.8	0.0	982200.4	263147.7
P104	56250.000	25.000	138.67	0.00	3500.2	0.0	985700.6	263147.7
P105	56275.000	25.000	128.69	0.00	3237.4	0.0	988938.0	263147.7
P106	56300.000	22.258	95.96	0.00	2145.8	0.0	991083.8	263147.7
P106-1	56319.517	12.500	47.98	0.00	603.8	0.0	991687.6	263147.7
P107	56325.000	15.242	36.64	0.00	562.4	0.0	992250.0	263147.7
P108	56350.000	25.000	1.48	19.22	37.4	478.1	992287.4	263625.9
P109	56375.000	25.000	0.00	78.49	0.0	1956.2	992287.4	265582.1
P110	56400.000	25.000	0.00	149.66	0.0	3735.8	992287.4	269317.9
P111	56425.000	25.000	0.00	218.09	0.0	5444.0	992287.4	274761.9
P112	56450.000	25.000	0.00	247.16	0.0	6174.3	992287.4	280936.2
P113	56475.000	25.000	0.00	230.85	0.0	5766.5	992287.4	286702.7
P114	56500.000	23.142	0.00	0.00	0.0	0.0	992287.4	286702.7
P114-1	56521.284	12.500	0.00	0.00	0.0	0.0	992287.4	286702.7
P115	56525.000	14.358	0.00	0.00	0.0	0.0	992287.4	286702.7
P116	56550.000	23.142	0.00	0.00	0.0	0.0	992287.4	286702.7
P116-1	56571.284	12.500	0.00	222.91	0.0	2786.5	992287.4	289489.2
P117	56575.000	14.358	0.00	217.97	0.0	3129.6	992287.4	292618.8
P118	56600.000	25.000	0.00	188.55	0.0	4713.7	992287.4	297332.4
P119	56625.000	25.000	0.00	176.56	0.0	4414.0	992287.4	301746.4
P120	56650.000	25.000	0.00	163.27	0.0	4081.8	992287.4	305828.2
P121	56675.000	25.000	0.00	199.82	0.0	4995.4	992287.4	310823.6
P122	56700.000	25.000	0.00	230.01	0.0	5750.2	992287.4	316573.9
P123	56725.000	21.509	0.00	222.38	0.0	4783.2	992287.4	321357.1
P123-1	56743.018	12.500	0.00	193.40	0.0	2417.5	992287.4	323774.6
P124	56750.000	15.991	0.00	178.63	0.0	2857.1	992287.4	326631.7
P125	56775.000	21.509	0.00	114.80	0.0	2469.9	992287.4	329101.6
P125-1	56793.018	12.500	0.00	65.57	0.0	819.7	992287.4	329921.3

P126	56800.000	15.991	0.00	49.45	0.0	790.3	992287.4	330711.6
P127	56825.000	25.000	0.00	37.94	0.0	946.8	992287.4	331658.5
P128	56850.000	25.000	0.00	44.97	0.0	1123.0	992287.4	332781.4
P129	56875.000	25.000	0.00	64.41	0.0	1608.4	992287.4	334389.8
P130	56900.000	25.000	0.00	91.21	0.0	2281.3	992287.4	336671.1
P131	56925.000	25.000	0.00	106.45	0.0	2664.2	992287.4	339335.3
P132	56950.000	25.000	0.00	94.51	0.0	2367.8	992287.4	341703.1
P133	56975.000	25.000	0.00	49.28	0.0	1233.4	992287.4	342936.5
P134	57000.000	25.000	0.00	16.88	0.0	423.1	992287.4	343359.6
P135	57025.000	25.000	21.35	0.00	532.1	0.0	992819.4	343359.6
P136	57050.000	21.711	15.06	0.00	326.1	0.0	993145.6	343359.6
P136-1	57068.423	12.500	9.90	0.21	122.7	2.6	993268.3	343362.2
P137	57075.000	15.789	9.72	0.39	152.3	6.2	993420.6	343368.4
P138	57100.000	22.716	9.36	0.30	211.0	6.9	993631.6	343375.3
P138-1	57120.432	12.500	15.38	0.10	190.9	1.3	993822.5	343376.6
P139	57125.000	14.784	17.62	0.08	258.6	1.2	994081.0	343377.9
P140	57150.000	12.840	48.48	0.00	618.1	0.0	994699.1	343377.9
P140-1	57150.681	12.500	51.30	0.00	636.8	0.0	995335.8	343377.9
P141	57175.000	24.660	172.84	0.00	4225.8	0.0	999561.6	343377.9
P142	57200.000	25.000	350.98	0.00	8656.0	0.0	1008217.6	343377.9
P143	57225.000	25.000	640.89	0.00	15702.8	0.0	1023920.4	343377.9
P144	57250.000	25.000	1058.11	0.00	25739.5	0.0	1049660.0	343377.9
P145	57275.000	25.000	1578.21	0.00	38207.2	0.0	1087867.2	343377.9
P146	57300.000	25.000	2268.95	0.00	54780.9	0.0	1142648.1	343377.9
P147	57325.000	25.000	2802.21	0.00	67449.9	0.0	1210097.9	343377.9

Num.	Abscisse	Longueur	Surfaces		Volumes Partiels		Volumes Cumulés	
			Déblai	Remblai	Déblai	Remblai	Déblai	Remblai
P148	57350.000	25.000	3072.86	0.00	73816.9	0.0	1283914.9	343377.9
P149	57375.000	25.000	2890.62	0.00	69278.7	0.0	1353193.6	343377.9
P150	57400.000	25.000	2413.47	0.00	57892.8	0.0	1411086.4	343377.9
P151	57425.000	25.000	1938.17	0.00	46549.3	0.0	1457635.7	343377.9
P152	57450.000	25.000	1481.21	0.00	35655.6	0.0	1493291.3	343377.9
P153	57475.000	25.000	1014.46	0.00	24491.4	0.0	1517782.7	343377.9
P154	57500.000	25.000	587.31	0.00	14264.6	0.0	1532047.3	343377.9
P155	57525.000	16.945	203.85	0.00	3382.4	0.0	1535429.7	343377.9
P155-1	57533.891	12.500	107.88	0.26	1324.0	3.2	1536753.7	343381.1
P156	57550.000	20.555	12.98	63.28	263.1	1315.0	1537016.8	344696.1
P157	57575.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	1537016.8	344696.1
P158	57600.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	1537016.8	344696.1
P159	57625.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	1537016.8	344696.1
P160	57650.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	1537016.8	344696.1
P161	57675.000	22.696	0.00	0.00	0.0	0.0	1537016.8	344696.1
P161-1	57695.392	12.500	0.00	0.00	0.0	0.0	1537016.8	344696.1
P162	57700.000	14.804	0.00	0.00	0.0	0.0	1537016.8	344696.1
P163	57725.000	22.696	0.00	0.00	0.0	0.0	1537016.8	344696.1
P163-1	57745.392	12.500	53.03	42.58	661.8	532.8	1537678.6	345228.9
P164	57750.000	8.022	68.05	17.68	545.9	141.8	1538224.5	345370.7
P164-1	57761.436	12.500	113.85	0.46	1423.1	5.7	1539647.6	345376.5
P165	57775.000	19.282	171.48	0.01	3306.4	0.1	1542954.0	345376.6
P166	57800.000	25.000	138.99	0.36	3474.8	9.0	1546428.9	345385.6
P167	57825.000	19.941	88.03	2.21	1755.4	44.2	1548184.3	345429.8
P167-1	57839.882	12.500	61.47	0.18	768.4	2.3	1548952.6	345432.0
P168	57850.000	17.559	36.64	0.69	643.3	12.1	1549596.0	345444.1
P169	57875.000	25.000	8.01	11.94	200.4	298.4	1549796.3	345742.6
P170	57900.000	25.000	0.00	34.71	0.0	867.7	1549796.3	346610.3
P171	57925.000	25.000	0.00	69.63	0.0	1740.8	1549796.3	348351.1
P172	57950.000	25.000	0.00	64.52	0.0	1613.0	1549796.3	349964.1
P173	57975.000	25.000	13.43	37.50	335.8	937.5	1550132.1	350901.6
P174	58000.000	25.000	30.68	24.15	766.9	603.8	1550899.0	351505.3
P175	58025.000	25.000	60.31	14.29	1507.8	357.2	1552406.8	351862.6
P176	58050.000	25.000	82.32	11.12	2058.0	278.0	1554464.8	352140.6
P177	58075.000	18.413	142.09	6.05	2616.3	111.4	1557081.1	352251.9
P177-1	58086.826	12.500	211.25	3.02	2640.6	37.8	1559721.8	352289.7

P178	58100.000	19.087	315.31	0.01	6018.4	0.2	1565740.1	352289.9
P179	58125.000	25.000	734.63	0.00	18365.8	0.0	1584105.9	352289.9
P180	58150.000	25.000	1200.81	0.00	30020.3	0.0	1614126.2	352289.9
P181	58175.000	25.000	1658.34	0.00	41458.5	0.0	1655584.8	352289.9
P182	58200.000	25.000	2050.34	0.00	51258.5	0.0	1706843.3	352289.9
P183	58225.000	25.000	2340.43	0.00	58510.7	0.0	1765354.0	352289.9
P184	58250.000	25.000	2430.65	0.10	60766.2	2.6	1826120.2	352292.5
P185	58275.000	25.000	2342.84	0.00	58570.9	0.0	1884691.1	352292.5
P186	58300.000	25.000	2083.89	0.00	52097.3	0.0	1936788.4	352292.5
P187	58325.000	25.000	1659.01	0.00	41475.4	0.0	1978263.7	352292.5
P188	58350.000	25.000	1182.51	0.00	29562.7	0.0	2007826.5	352292.5
P189	58375.000	25.000	952.50	0.00	23812.4	0.0	2031638.9	352292.5
P190	58400.000	25.000	997.28	0.00	24932.1	0.0	2056570.9	352292.5
P191	58425.000	25.000	1225.45	0.00	30636.4	0.0	2087207.3	352292.5
P192	58450.000	25.000	1551.55	0.00	38788.8	0.0	2125996.1	352292.5
P193	58475.000	25.000	1715.84	0.22	42896.1	5.6	2168892.2	352298.1
P194	58500.000	25.000	1773.21	0.13	44330.3	3.2	2213222.5	352301.3
P195	58525.000	25.000	1813.50	0.00	45337.4	0.0	2258560.0	352301.3
P196	58550.000	25.000	1839.97	0.00	45999.2	0.0	2304559.1	352301.3
P197	58575.000	25.000	1992.46	0.00	49811.4	0.0	2354370.5	352301.3
P198	58600.000	25.000	1964.20	0.00	49105.0	0.0	2403475.5	352301.3
P199	58625.000	25.000	1704.49	0.00	42612.2	0.0	2446087.7	352301.3
P200	58650.000	25.000	1320.34	0.00	33008.5	0.0	2479096.2	352301.3
P201	58675.000	25.000	912.43	0.00	22810.8	0.0	2501907.0	352301.3
P202	58700.000	25.000	667.51	0.00	16687.7	0.0	2518594.7	352301.3

Num.	Abscisse	Longueur	Surfaces		Volumes Partiels		Volumes Cumulés	
			Déblai	Remblai	Déblai	Remblai	Déblai	Remblai
P203	58725.000	25.000	490.53	0.00	12263.3	0.0	2530858.0	352301.3
P204	58750.000	25.000	308.74	0.00	7718.6	0.0	2538576.5	352301.3
P205	58775.000	24.136	149.98	0.00	3620.0	0.0	2542196.5	352301.3
P205-1	58798.272	11.994	51.01	0.00	611.8	0.0	2542808.3	352301.3
P205-2	58798.988	0.864	48.64	0.03	42.0	0.0	2542850.4	352301.3
P206	58800.000	13.006	45.34	0.14	590.6	1.9	2543441.0	352303.2
P207	58825.000	25.000	0.00	39.02	0.0	972.2	2543441.0	353275.4
P208	58850.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P209	58875.000	19.136	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P209-1	58888.272	12.500	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P210	58900.000	18.364	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P211	58925.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P212	58950.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P213	58975.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P214	59000.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P215	59025.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P216	59050.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P217	59075.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P218	59100.000	18.244	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P218-1	59111.488	12.500	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P219	59125.000	19.256	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P220	59150.000	19.248	0.00	0.00	0.0	0.0	2543441.0	353275.4
P220-1	59163.497	12.500	0.00	78.32	0.0	992.7	2543441.0	354268.1
P221	59175.000	18.252	0.00	34.91	0.0	644.7	2543441.0	354912.8
P222	59200.000	25.000	36.74	0.64	899.4	16.3	2544340.4	354929.1
P223	59225.000	25.000	87.14	0.00	2139.7	0.0	2546480.0	354929.1
P224	59250.000	19.318	168.52	0.00	3195.5	0.0	2549675.5	354929.1
P224-1	59263.636	12.500	230.13	0.00	2819.4	0.0	2552494.9	354929.1
P225	59275.000	18.182	308.59	0.00	5492.5	0.0	2557987.4	354929.1
P226	59300.000	25.000	517.04	0.00	12678.5	0.0	2570665.8	354929.1
P227	59325.000	25.000	658.14	0.00	16303.7	0.0	2586969.6	354929.1
P228	59350.000	14.318	724.71	0.00	10346.1	0.0	2597315.7	354929.1
P228-1	59353.636	12.500	713.76	0.00	8921.6	0.0	2606237.4	354929.1
P229	59375.000	23.182	602.08	0.00	13957.5	0.1	2620194.9	354929.2
P230	59400.000	25.000	530.82	0.00	13270.5	0.0	2633465.4	354929.2
P231	59425.000	25.000	561.04	0.00	14026.1	0.0	2647491.5	354929.2

P232	59450.000	25.000	515.23	0.00	12880.7	0.0	2660372.1	354929.2
P233	59475.000	25.000	356.92	0.00	8923.0	0.0	2669295.1	354929.2
P234	59500.000	25.000	230.17	0.00	5754.3	0.0	2675049.4	354929.2
P235	59525.000	24.688	131.96	0.00	3257.9	0.0	2678307.3	354929.2
P235-1	59549.376	12.500	40.98	0.00	512.3	0.0	2678819.5	354929.2
P236	59550.000	12.812	39.16	0.00	501.7	0.0	2679321.2	354929.2
P237	59575.000	25.000	2.21	0.99	55.3	24.8	2679376.6	354954.0
P238	59600.000	25.000	3.49	0.24	87.1	6.1	2679463.7	354960.1
P239	59625.000	25.000	15.31	0.00	382.7	0.0	2679846.4	354960.1
P240	59650.000	15.736	28.57	0.00	449.5	0.0	2680295.9	354960.1
P240-1	59656.473	12.500	41.86	0.00	523.2	0.0	2680819.2	354960.1
P241	59675.000	21.764	100.08	0.00	2178.2	0.0	2682997.4	354960.1
P242	59700.000	25.000	230.22	0.00	5755.4	0.0	2688752.8	354960.1
P243	59725.000	25.000	404.64	0.00	10116.1	0.0	2698868.9	354960.1
P244	59750.000	12.615	607.25	0.00	7660.2	0.0	2706529.1	354960.1
P244-1	59750.229	12.500	609.47	0.00	7622.3	0.0	2714151.4	354960.1
P245	59775.000	24.885	836.90	0.11	20883.6	2.7	2735035.1	354962.8
P246	59800.000	25.000	988.19	0.00	24971.2	0.0	2760006.3	354962.8
P247	59825.000	20.115	885.58	0.00	18099.3	0.0	2778105.6	354962.8
P247-1	59840.229	12.500	775.30	0.00	9826.6	0.0	2787932.1	354962.8
P248	59850.000	17.385	733.13	0.00	12879.7	0.0	2800811.8	354962.8
P249	59875.000	25.000	741.87	0.00	18755.7	0.0	2819567.5	354962.8
P250	59900.000	25.000	818.53	0.00	20766.8	0.0	2840334.3	354962.8
P251	59925.000	25.000	817.45	0.00	20820.6	0.0	2861154.8	354962.8
P252	59950.000	25.000	639.98	0.00	16314.3	0.0	2877469.1	354962.8

Num.	Abscisse	Longueur	Surfaces		Volumes Partiels		Volumes Cumulés	
			Déblai	Remblai	Déblai	Remblai	Déblai	Remblai
P253	59975.000	25.000	382.35	0.00	9701.9	0.0	2887171.1	354962.8
P254	60000.000	25.000	176.75	0.00	4471.3	0.0	2891642.4	354962.8
P255	60025.000	21.941	97.59	0.00	2159.6	0.0	2893802.0	354962.8
P255-1	60043.882	12.500	43.95	0.00	553.9	0.0	2894355.9	354962.8
P256	60050.000	15.559	23.99	0.00	377.1	0.0	2894733.0	354962.8
P257	60075.000	25.000	0.00	38.02	0.0	943.6	2894733.0	355906.4
P258	60100.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P259	60125.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P260	60150.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P261	60175.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P262	60200.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P263	60225.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P264	60250.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P265	60275.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P266	60300.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P267	60325.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P268	60350.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P269	60375.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P270	60400.000	25.000	0.00	0.00	0.0	0.0	2894733.0	355906.4
P271	60425.000	25.000	0.00	90.13	0.0	2259.7	2894733.0	358166.0
P272	60450.000	25.000	0.00	17.78	0.0	445.6	2894733.0	358611.6
P273	60475.000	18.798	17.78	0.00	335.0	0.0	2895067.9	358611.6
P273-1	60487.596	12.500	41.75	0.00	523.3	0.0	2895591.3	358611.6
P274	60500.000	18.702	108.22	0.00	2032.0	0.0	2897623.2	358611.6
P275	60525.000	25.000	160.54	0.00	4051.4	0.0	2901674.6	358611.6
P276	60550.000	19.891	100.79	0.00	2016.3	0.0	2903690.9	358611.6
P276-1	60564.781	12.500	45.19	0.00	570.3	0.0	2904261.2	358611.6
P277	60575.000	17.609	12.79	0.78	229.2	13.6	2904490.4	358625.2
P278	60600.000	25.000	0.00	60.93	0.0	1514.4	2904490.4	360139.6
P279	60625.000	25.000	0.00	134.99	0.0	3359.7	2904490.4	363499.3
P280	60650.000	14.762	0.00	148.02	0.0	2179.1	2904490.4	365678.4
P280-1	60654.525	12.500	0.00	143.66	0.0	1790.2	2904490.4	367468.6
P281	60675.000	22.738	0.00	125.09	0.0	2833.6	2904490.4	370302.2
P282	60700.000	17.776	0.00	35.42	0.0	626.8	2904490.4	370929.1
P282-1	60710.552	12.500	3.61	5.53	46.1	68.5	2904536.5	370997.5
P283	60725.000	7.480	43.62	0.00	329.2	0.0	2904865.6	370997.5

P283-1	60725.511	12.500	45.32	0.00	571.4	0.0	2905437.1	370997.5
P284	60750.000	24.744	144.34	0.00	3605.9	0.0	2909043.0	370997.5
P285	60775.000	25.000	221.92	0.00	5604.1	0.0	2914647.1	370997.5
P286	60800.000	25.000	261.17	0.00	6568.6	0.0	2921215.7	370997.5
P287	60825.000	25.000	295.70	0.00	7380.8	0.0	2928596.5	370997.5
P288	60850.000	25.000	350.33	0.00	8744.1	0.0	2937340.7	370997.5
P289	60875.000	25.000	418.40	0.00	10447.2	0.0	2947787.8	370997.5
P290	60900.000	25.000	470.82	0.00	11806.8	0.0	2959594.6	370997.5
P291	60925.000	25.000	569.24	0.00	14351.3	0.0	2973945.9	370997.5
P292	60950.000	14.295	745.73	0.00	10795.8	0.0	2984741.7	370997.5
P292-1	60953.589	12.500	774.68	0.00	9812.3	0.0	2994554.0	370997.5
P293	60975.000	23.205	984.25	0.00	23165.2	0.0	3017719.2	370997.5
P294	61000.000	25.000	1102.46	0.00	27902.6	0.0	3045621.8	370997.5
P295	61025.000	21.795	1041.00	0.00	22842.2	0.0	3068463.9	370997.5
P295-1	61043.589	12.500	995.10	0.00	12454.8	0.0	3080918.7	370997.5
P296	61050.000	15.705	965.03	0.00	15156.2	0.0	3096074.9	370997.5
P297	61075.000	25.000	850.57	0.00	21264.2	0.0	3117339.1	370997.5
P298	61100.000	25.000	739.10	0.00	18477.5	0.0	3135816.6	370997.5
P299	61125.000	25.000	573.76	0.00	14344.0	0.0	3150160.5	370997.5
P300	61150.000	25.000	506.77	0.00	12669.2	0.0	3162829.8	370997.5
P301	61175.000	25.000	460.35	0.00	11508.7	0.0	3174338.5	370997.5
P302	61200.000	25.000	395.89	0.00	9897.2	0.0	3184235.7	370997.5
P303	61225.000	25.000	418.45	0.00	10461.2	0.0	3194696.9	370997.5
P304	61250.000	25.000	486.66	0.00	12166.4	0.0	3206863.3	370997.5
P305	61275.000	25.000	594.79	0.00	14869.8	0.0	3221733.1	370997.5

Num.	Abscisse	Longueur	Surfaces		Volumes Partiels		Volumes Cumulés	
			Déblai	Remblai	Déblai	Remblai	Déblai	Remblai
P306	61300.000	25.000	610.36	0.00	15259.0	0.0	3236992.1	370997.5
P307	61325.000	25.000	652.54	0.00	16313.5	0.0	3253305.6	370997.5
P308	61350.000	25.000	757.19	0.00	18929.8	0.0	3272235.4	370997.5
P309	61375.000	25.000	852.46	0.00	21311.5	0.0	3293546.9	370997.5
P310	61400.000	22.700	931.54	0.00	21145.5	0.0	3314692.4	370997.5
P310-1	61420.399	12.500	942.95	0.00	11785.6	0.0	3326478.0	370997.5
P311	61425.000	14.800	926.00	0.00	13639.6	0.0	3340117.6	370997.5
P312	61450.000	25.000	838.19	0.00	20688.9	0.0	3360806.6	370997.5
P313	61475.000	20.200	750.65	0.00	14863.8	0.0	3375670.4	370997.5
P313-1	61490.399	12.500	677.97	0.00	8277.0	0.0	3383947.4	370997.5
P314	61500.000	17.300	634.90	0.01	10728.2	0.2	3394675.6	370997.8
P315	61525.000	25.000	502.01	0.00	12271.0	0.0	3406946.6	370997.8
P316	61550.000	25.000	383.23	0.00	9373.1	0.0	3416319.7	370997.8
P317	61575.000	25.000	278.00	0.00	6813.9	0.0	3423133.6	370997.8
P318	61600.000	25.000	183.38	0.00	4517.6	0.0	3427651.3	370997.8
P319	61625.000	25.000	75.65	0.00	1868.7	0.0	3429520.0	370997.8
P320	61650.000	25.000	7.12	16.30	175.1	411.2	3429695.1	371409.0
P321	61675.000	25.000	0.00	97.55	0.0	2459.0	3429695.1	373868.0
P322	61700.000	25.000	0.00	142.29	0.0	3595.2	3429695.1	377463.2
P323	61725.000	25.000	0.00	147.54	0.0	3734.7	3429695.1	381197.9
P324	61750.000	25.000	0.00	141.18	0.0	3576.8	3429695.1	384774.7
P325	61775.000	25.000	0.00	118.09	0.0	2993.5	3429695.1	387768.2
P326	61800.000	25.000	0.00	70.44	0.0	1784.0	3429695.1	389552.2
P327	61825.000	25.000	22.08	7.87	543.2	198.9	3430238.3	389751.1
P328	61850.000	25.000	86.61	0.00	2147.7	0.0	3432386.0	389751.1
P329	61875.000	25.000	134.01	0.00	3326.3	0.0	3435712.3	389751.1
P330	61900.000	25.000	225.40	0.00	5611.6	0.0	3441323.9	389751.1
P331	61925.000	25.000	344.08	0.00	8592.0	0.0	3449915.9	389751.1
P332	61950.000	25.000	369.62	0.00	9255.5	0.0	3459171.4	389751.1
P333	61975.000	25.000	428.29	0.00	10761.8	0.0	3469933.2	389751.1
P334	62000.000	25.000	424.59	0.00	10689.5	0.0	3480622.7	389751.1
P335	62025.000	25.000	525.41	0.00	13197.6	0.0	3493820.3	389751.1
P336	62050.000	25.000	550.24	0.00	13797.0	0.0	3507617.3	389751.1
P337	62075.000	25.000	601.45	0.00	14997.9	0.0	3522615.2	389751.1
P338	62100.000	25.000	601.02	0.00	14877.4	0.0	3537492.6	389751.1
P339	62125.000	25.000	601.42	0.00	14836.3	0.0	3552328.9	389751.1

P340	62150.000	25.000	570.50	0.00	13998.3	0.0	3566327.2	389751.1
P341	62175.000	25.000	485.05	0.00	11879.9	0.0	3578207.1	389751.1
P342	62200.000	25.000	388.99	0.00	9529.8	0.0	3587736.9	389751.1
P343	62225.000	25.000	342.80	0.00	8431.5	0.0	3596168.4	389751.1
P344	62250.000	25.000	297.66	0.00	7339.3	0.0	3603507.7	389751.1
P345	62275.000	25.000	305.39	0.00	7516.9	0.0	3611024.6	389751.1
P346	62300.000	25.000	279.40	0.00	6872.9	0.0	3617897.5	389751.1
P347	62325.000	25.000	227.76	0.00	5613.6	0.0	3623511.1	389751.1
P348	62350.000	25.000	168.00	0.00	4142.2	0.0	3627653.3	389751.1
P349	62375.000	25.000	130.04	0.00	3220.8	0.0	3630874.1	389751.1
P350	62400.000	25.000	114.86	0.00	2853.4	0.0	3633727.5	389751.1
P351	62425.000	14.222	51.02	0.00	721.2	0.0	3634448.7	389751.1
P351-1	62428.444	12.500	41.87	0.00	519.7	0.0	3634968.4	389751.1
P352	62450.000	23.278	1.19	26.19	27.3	615.4	3634995.6	390366.5
P353	62475.000	25.000	0.00	205.17	0.0	5187.8	3634995.6	395554.3
P354	62500.000	25.000	0.00	307.12	0.0	7806.7	3634995.6	403361.0
P355	62525.000	25.000	0.00	263.47	0.0	6689.9	3634995.6	410050.9
P356	62550.000	25.000	0.00	91.17	0.0	2303.9	3634995.6	412354.8
P357	62575.000	13.803	33.48	0.60	457.4	8.5	3635453.1	412363.2
P357-1	62577.605	12.500	42.07	0.08	521.0	1.1	3635974.0	412364.3
P358	62600.000	23.697	153.39	0.00	3590.9	0.0	3639564.9	412364.3
P359	62625.000	25.000	222.85	0.00	5489.7	0.0	3645054.6	412364.3
P360	62650.000	25.000	341.74	0.00	8384.7	0.0	3653439.3	412364.3
P361	62675.000	25.000	473.57	0.24	11597.4	6.2	3665036.8	412370.5
P362	62700.000	25.000	518.31	0.00	12686.0	0.0	3677722.8	412370.5

Num.	Abscisse	Longueur	Surfaces		Volumes Partiels		Volumes Cumulés	
			Déblai	Remblai	Déblai	Remblai	Déblai	Remblai
P363	62725.000	25.000	520.07	0.00	12708.7	0.0	3690431.5	412370.5
P364	62750.000	25.000	467.68	0.00	11431.8	0.0	3701863.3	412370.5
P365	62775.000	25.000	405.18	0.00	9908.5	0.0	3711771.8	412370.5
P366	62800.000	25.000	413.71	0.00	10061.2	0.0	3721833.0	412370.5
P367	62825.000	25.000	392.95	0.00	9540.8	0.0	3731373.8	412370.5
P368	62850.000	25.000	436.88	0.00	10594.2	0.0	3741968.0	412370.5
P369	62875.000	25.000	350.29	0.00	8549.4	0.0	3750517.4	412370.5
P370	62900.000	25.000	284.79	0.00	6977.1	0.0	3757494.4	412370.5
P371	62925.000	25.000	225.19	0.00	5523.6	0.0	3763018.0	412370.5
P372	62950.000	25.000	150.52	0.00	3695.2	0.0	3766713.2	412370.5
P373	62975.000	25.000	113.57	0.00	2788.4	0.0	3769501.6	412370.5
P374	63000.000	25.000	88.67	0.40	2175.9	10.3	3771677.5	412380.8
P375	63025.000	24.943	73.42	0.21	1803.8	5.3	3773481.3	412386.1
P375-1	63049.886	12.500	54.18	0.02	668.9	0.3	3774150.2	412386.5
P376	63050.000	12.557	54.07	0.03	670.5	0.3	3774820.7	412386.8
P377	63075.000	25.000	26.89	1.88	662.2	47.5	3775483.0	412434.2
P378	63100.000	25.000	0.00	71.57	0.0	1805.9	3775483.0	414240.1
P379	63125.000	25.000	0.00	182.74	0.0	4629.4	3775483.0	418869.5
P380	63150.000	25.000	0.00	347.16	0.0	8827.8	3775483.0	427697.3
P381	63175.000	25.000	0.27	447.93	6.4	11417.0	3775489.4	439114.3
P382	63200.000	25.000	0.00	499.05	0.0	12764.2	3775489.4	451878.4
P383	63225.000	25.000	0.00	472.64	0.0	12064.9	3775489.4	463943.3
P384	63250.000	25.000	0.00	471.55	0.0	12035.6	3775489.4	475978.9
P385	63275.000	25.000	0.06	469.59	1.6	12000.5	3775491.0	487979.4
P386	63300.000	17.153	0.00	433.23	0.0	7587.9	3775491.0	495567.3
P386-1	63309.307	12.500	0.00	415.43	0.0	5295.4	3775491.0	500862.7
P387	63325.000	20.347	0.00	386.35	0.0	7976.6	3775491.0	508839.3
P388	63350.000	25.000	0.00	325.19	0.0	8196.1	3775491.0	517035.3
P389	63375.000	14.653	0.00	249.78	0.0	3669.7	3775491.0	520705.1
P389-1	63379.307	12.500	0.00	236.04	0.0	2950.7	3775491.0	523655.8
P390	63400.000	22.847	0.00	188.62	0.0	4309.4	3775491.0	527965.2
P391	63425.000	25.000	0.00	149.98	0.0	3749.6	3775491.0	531714.8
P392	63450.000	25.000	0.00	131.13	0.0	3278.3	3775491.0	534993.1
P393	63475.000	25.000	0.00	150.54	0.0	3763.6	3775491.0	538756.7
P394	63500.000	25.000	0.00	215.71	0.0	5392.7	3775491.0	544149.4
P395	63525.000	25.000	0.00	225.20	0.0	5630.0	3775491.0	549779.4

P396	63550.000	25.000	0.00	156.33	0.0	3908.2	3775491.0	553687.6
P397	63575.000	25.000	2.57	53.82	64.1	1345.5	3775555.1	555033.0
P398	63600.000	18.697	30.44	4.95	569.2	92.6	3776124.3	555125.6
P398-1	63612.395	12.500	62.34	0.00	779.3	0.0	3776903.6	555125.6
P399	63625.000	18.803	94.54	0.00	1777.5	0.0	3778681.1	555125.6
P400	63650.000	25.000	198.78	0.00	4969.5	0.0	3783650.6	555125.6
P401	63675.000	25.000	266.25	0.00	6656.3	0.0	3790307.0	555125.6
P402	63700.000	25.000	294.41	0.00	7360.2	0.0	3797667.2	555125.6
P403	63725.000	25.000	243.33	0.00	6083.3	0.0	3803750.5	555125.6
P404	63750.000	25.000	179.93	0.00	4498.2	0.0	3808248.7	555125.6
P405	63775.000	17.908	139.42	0.00	2496.6	0.0	3810745.4	555125.6
P405-1	63785.815	12.500	118.77	0.00	1484.0	0.0	3812229.4	555125.6
P406	63800.000	19.592	106.62	0.00	2081.4	0.0	3814310.8	555125.6
P407	63825.000	25.000	91.86	0.00	2278.9	0.0	3816589.7	555125.6
P408	63850.000	20.408	81.30	0.00	1643.8	0.0	3818233.5	555125.6
P408-1	63865.815	12.500	79.39	0.00	982.4	0.0	3819215.9	555125.6
P409	63875.000	17.092	78.83	0.00	1333.5	0.0	3820549.4	555125.6
P410	63900.000	25.000	124.21	0.00	3083.1	0.0	3823632.5	555125.6
P411	63925.000	25.000	229.30	0.00	5675.6	0.0	3829308.1	555125.6
P412	63950.000	25.000	379.61	0.00	9367.3	0.0	3838675.4	555125.6
P413	63975.000	25.000	531.76	0.00	13061.2	0.0	3851736.6	555125.6
P414	64000.000	25.000	662.40	0.00	16212.0	0.0	3 867 948.6	555 125.6
						Total déblais en m3		3 867 948.6
						Total remblais en m3		555 125.6