

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

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية  
فرنسيس جانسون

École Nationale Supérieure des Travaux Publics

Francis Jeanson



## Mémoire

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

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Matériaux & Structures

## Thème

**Etude APD de la nouvelle ligne ferroviaire  
Boughezoul - Djelfa à voie unique avec une vitesse  
de 220 Km/h du PK142+00 au PK155+00 (13km)**

**Présenté par :**

BEN REKHA Omar  
HEDIMI Moussa

**Encadré par :**

Mr. BENOUMECHIARA Salah  
Mr. HAMADI Kamel

Promotion 2019 /2020

# Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon Dieu, le clément et le Miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce Modeste travail.

En second lieu nous tenons à remercier notre encadreur Mr. BENOUMECHIARA Salah et notre co-encadreur Mr. HAMADI Kamel.

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

Nous tenons également à remercier les honorables membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont accordés en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous tenons également à remercier M. HODNI Yacine directeur du projet et aussi M. AMOR Adel sous-directeur technique et surtout M. KHELIF Aissa et KHENNICHE Brahim des ingénieurs Travaux publics qui ont été très précis dans leur explication et très patients pour répondre à toutes nos questions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

**BENREKHA - HEDIMI**

## *Dédicace*

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

*Je dédie ce travail :*

*A Ma Très Chère Mère*

Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que  
j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un  
encouragement. Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de tendresse, ta prière et ta  
bénédictioin m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Vous m'avez aidé et  
soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée.  
Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie

**A Mon cher père**

Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour.  
Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin.  
J'implore Dieu, tout puissant, de vous accorder une bonne santé, une longue vie et beaucoup  
de bonheur.

A Mes chers frères **Belkacem** et **Abdou** et à Mes chères **sœurs**.

A mes neveux **Younes Adam** et **Taha** et ma nièce **Israa**.

A tous mes amis, particulièrement : **Toufik, Boubaker, Mustapha, Abdeljalil, Abdellatif,  
Sedik**

A mon binôme : **HEDIMI Moussa**.

Aux ingénieurs : **Abdou, Mohamed, Yassine, Ihab, Ahmed, Ihab, Bari**.

A tous mes enseignants du primaire jusqu'à l'université.

A toute ma famille.

A tout qui connaît OMAR de près ou de loins.

***BENREKHA OMAR***

## *Dédicace*

بسم الله الرحمن الرحيم والصلاة والسلام على رسوله الكريم محمد سيد الخلق  
أجمعين، الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات والذي وفقنا إلى إتمام هذا العمل البسيط

Tout d'abord je dois remercier mes chers parents, mon père  
ABDELKADER et ma mère HOURIA, et toutes mes sœurs SARA,  
AICHA, SOUMIA, et ma petite sœurs AYA ainsi que mon frère  
ABDELLAH, je les remercie infiniment pour leur soutien moral et  
matériel durant toute ma carrière autant qu'un étudiant.

Dédicace aussi pour toute ma précieuse famille HEDIMI et tout mes  
amis et mes voisins et tous les citoyens de notre ville Damous.

Et a la fin un Dédicace pour tous mes chers collègues et amis et frères de  
l'ENSTP OMAR, IHAB, AHMED, YACINE, ABDELBARI, IBRAHIM  
..... et tous les autres étudiants et je les souhaite une bonne  
continuation.

***HEDIMI MOUSSA***

## ملخص

هذا المشروع يدرس جزء من خط السكة الحديدية الجديد الرابط بين بوغزول و الجلفة في مرحلة التصميم التفصيلي هذا الجزء الذي يمتد من النقطة الكيلومترية 142+000 الى النقطة الكيلومترية 155+000 تم تصميمه مع الاخذ بعين الاعتبار الجوانب الجيولوجية الجيوتقنية و الهيدرولوجية للمنطقة.  
تم تنفيذ هذا المشروع وفقاً لمعايير الاتحاد الدولي للسكك (UIC) وتوصيات الشركة الوطنية للنقل بالسكك الحديدية (SNTF)

برامج النمذجة والحساب المستخدمة في المشروع هي : Autocad 2019، Civil 3D 2019، Slide 6.0، الكلمات المفتاحية : سكك حديدية , عين وسارة , civil 3d , حجر الرص .

## Résumé

Le présent mémoire est consacré à l'étude d'un tronçon de la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique reliant BOUGHEZOUL-DJELFA en phase d'avant-projet détaillé (APD), ce tronçon qui débute du PK 142+000 jusqu'au PK 155+000 est établis en tenant compte de l'aspect géologique, géotechnique et hydraulique de la région.

Ce projet a été réalisé suivant les normes de l'union internationale de chemin de fer (UIC) et les recommandations de la Société nationale de transport ferroviaire (SNTF).

Les logiciels de modélisation et de calcul utilisé dans le projet sont : Autocad 2019, Civil 3D 2019, Slide 6.0

Mots clés : Chemins de fer, Ain Oussera, civil 3d, ballast.

## Abstract

This project is mainly to the study of section of the new railway line connecting BOUGHEZOUL-DJELFA in the step of detailed design, this section which is from the PK 142+000 to PK 155+000 is established by geological, geotechnical and hydrological studies of the area.

This projet was realised according to International Railway Union standards (UIC) and the Algerian national railway company recommendations of the (SNTF).

Modeling softwares used in this project are: Autocad 2019, Civil 3D 2019, Slide 6.0

Key words: Railway, Ain Oussera, civil 3d, Bedded layers.

**SOMMAIRE**

<b>Introduction générale :</b> .....	1
<b>Chapitre I : Mécanisme de tassement du ballast et sa variabilité</b>	
I.1. Introduction.....	2
I.2. La voie ferrée ballastée .....	2
I.2.1. La voie .....	2
I.2.2. Composants de la voie .....	2
I.2.3. Les sollicitations .....	3
I.2.4. Les Défauts de la voie.....	4
I.3. Le ballast.....	4
I.3.1. Le rôle du ballast.....	5
I.3.2. Les caractéristiques du ballast .....	5
I.4. Étude de tassement du ballast .....	6
I.4.1. Approches expérimentales .....	7
I.4.2. Approches numériques.....	10
I.5. Variabilité de la déformation du ballast : tassement différentiel .....	10
I.6. les solutions envisageables pour ce phénomène de tassement.....	11
I.6.1. Correction de la géométrie par bourrage-nivellement-dressage .....	11
I.7. Conclusion .....	12
<b>Chapitre II: chemin de fer en Algérie</b>	
II.1. Introduction .....	13
II.2. Histoire de construction du chemin de fer en Algérie .....	13
II.2.1. Pendant la colonisation française .....	13
II.2.2. Après l'indépendance de l'Algérie .....	13
II.3. Le réseau ferroviaire national actuel.....	14
II.4. Plan de développement.....	15
II.4.1. Rcade Nord et ses dessertes .....	16
II.4.2. Rcade des Hauts Plateaux.....	16
II.4.3. Ligne Minière Est : 588 km .....	16
II.4.5. Pénétrante Ouest, Est et Pénétrante centre .....	16
II.4.6. Boucle Sud-Est et Sud-Ouest .....	16
II.4.7. Travaux à lancer .....	17
II.5. Conclusion .....	17

**Chapitre III : Présentation de projet**

III.1. Introduction .....	18
III.2. Description de projet .....	18
III.3. Localisation du projet de fin d'études .....	18
III.4. Intervenants Du Projet.....	19
III.5. Présentation de la wilaya de Djelfa .....	20
III.5.1. La wilaya de DJELFA.....	20
III.5.2. Relief .....	20
III.5.3. Climatologie .....	21
III.6. Objectifs du projet .....	21
III.7. Les données de notre projet.....	22
III.8. Conclusion .....	22

**Chapitre IV : Superstructure de la voie**

IV.1. Introduction .....	23
IV.2. Les caractéristiques de la voie .....	23
IV.3. Catégorie de la voie.....	23
IV.4. Les composantes de la voie.....	23
IV.4.1. Les rails .....	24
IV.4.2. Les traverses.....	27
IV.4.3. Les attaches .....	29
IV.5. Les appareils de la voie .....	30
IV.6. Conclusion .....	31

**Chapitre V : Géométrie de la voie**

V.1. Introduction .....	32
V.2. Tracé en plan .....	32
V.2.1. Catégories de profil des lignes de chemin de fer.....	32
V.2.2. Catégories de trafic.....	32
V.2.3. Les règles à respecter dans le tracé en plan .....	33
V.2.4. Les conditions de raccordement .....	33
V.2.5. Les éléments du tracé en plan.....	33
V.2.6. Le raccordement progressif (RP) .....	35
V.2.7. Géométrie des courbes de raccordement de la voie en plan.....	36
V.2.8. La section transversale .....	37
V.2.8.1. Le dévers théorique (le dévers d'équilibre).....	37

V.2.8.2. Le dévers pratique (le dévers prescrit) et le coefficient de dévers .....	38
V.2.8.3. Dévers maximaux en plein courbe .....	39
V.2.8.4. Insuffisance de dévers .....	40
V.2.8.5. Excès de dévers .....	41
V.2.9. Interaction entre trace en plan et section transversale .....	42
V.2.9.1. La variation de dévers dans les courbes de transition $\Delta d/\Delta l$ [mm/m] .....	42
V.2.9.2. La variation de dévers en fonction du temps $\Delta d/\Delta t$ .....	43
V.2.9.3. La variation de l'insuffisance de dévers $\Delta I/\Delta t$ .....	43
V.2.10. Application au projet .....	43
V.2.11. Les contraintes le long du tracé .....	44
V.3. Le profil en long .....	45
V.3.1. Les règles à respecter dans le tracé du profil en long .....	45
V.3.2. Détermination des éléments caractéristiques du profil en long .....	45
V.3.2.1. Déclivité maximale .....	45
V.3.2.2. Rayons de raccord de déclivités .....	46
V.3.2.3. Longueur minimale des éléments de profil en long .....	46
V.3.2.4. Positionnement des points de changement de déclivité .....	46
V.3.3. Coordination profil en long et tracé en plan .....	46
V.4. Le profil en travers .....	47
V.4.1. Classification du profil en travers .....	47
V.4.1.1. Le profil en travers type .....	47
V.4.1.2. Le profil en travers courant .....	47
V.4.2. Les éléments de profil en travers .....	48
V.4.3. Les profils en travers affectés au projet .....	48
<b>Chapitre VI : Etude géologique et géotechnique</b>	
VI.1. Introduction .....	49
VI.2. Etude géologique .....	49
VI.2.1 Cadre géologique général .....	49
VI.2.2. Géologie locale de la zone d'étude .....	50
VI.2.3. Sismicité de la zone .....	51
VI.2.4. Risques géologiques .....	52
VI.3. Etude géotechnique .....	53
VI.3.1. Essais in situ .....	53
VI.3.1.1. Puits de reconnaissance .....	53

VI.3.1.2. Sondages mécaniques carottés .....	54
VI.3.1.3. Essais de pénétration dynamique .....	54
VI.3.2. Les essais au laboratoire .....	56
VI.3.2.1. Les essais d'identifications physiques .....	56
3.2.2. Les essais chimiques .....	56
VI.3.2.3. Essais mécaniques .....	56
VI.3.3. Résultats des essais au laboratoire .....	57
VI.3.4. Interprétation des résultats .....	58
VI.3.5. Classification des sols .....	60
VI.3.5.1. Classifications selon GTR.....	60
VI.3.5.2. Classification selon UIC (719 R).....	60
VI.4. Conclusion .....	61
<b>Chapitre VII : Terrassements et structure d'assise</b>	
VII.1. Terrassements .....	62
VII.1.1. Travaux de préparation du terrain.....	62
VII.1.1.1. Débroussaillage et essartage .....	62
VII.1.1.2. Décapage de terre végétale .....	62
VII.1.2. Déblais .....	62
VII.1.2.1. Méthodes d'excavation .....	62
VII.1.2.2. Classification des matériaux en vue de leur réutilisation .....	63
VII.1.2.3. Géométries des talus de déblai .....	64
VII.1.2.4. Revêtement et drainage des talus de déblai .....	64
VII.1.2.5. Analyses de stabilité globale des talus de déblai .....	65
VII.1.3. Remblais .....	65
VII.1.3.1. Géométrie des talus de remblais .....	66
VII.1.3.2. Protection superficielle des talus en remblais.....	66
VII.1.3.3. L'analyse de stabilité des talus de remblais.....	66
VII.1.4. Calcule des cubatures.....	66
VII.2. Structure d'assise .....	67
VII.2.1. Les constituants de la structure d'assises.....	67
VII.2.1.1. Le ballast.....	67
VII.2.1.2. La sous-couche .....	68
VII.2.1.3. La plateforme.....	68
VII.2.2. Classes de qualité des sols .....	69

VII.2.3. Classe de portance des plateformes .....	69
VII.2.4. Calcul de l'épaisseur minimale e de la couche d'assise .....	69
VII.2.5. Application à notre projet .....	70
VII.3. Gite d'emprunt.....	71
<b>Chapitre VIII : Étude hydrologique et assainissement</b>	
VIII.1. Étude hydrologique .....	73
VIII.1.1. Considérations générales .....	73
VIII.1.2. Données pluviométriques .....	74
VIII.1.3. Caractéristiques des paramètres des bassins versants .....	75
VIII.1.4. Détermination du débit de crue .....	76
VIII.1.4.1 La méthode rationnelle .....	76
1.4.2. Coefficient de ruissellement.....	76
VIII.1.4.3. Intensité de la pluie.....	76
VIII.1.4.4. Le temps de concentration d'eau $T_c$ .....	77
VIII.1.5. Application au projet .....	77
VIII.2. L'étude hydraulique.....	78
VIII.2.1. Le débit de saturation $Q_s$ .....	78
VIII.2.2. Le drainage transversal.....	78
VIII.2.2.1. Dimensionnements des dalots .....	78
VIII.2.2.2. Dimensionnements des buses .....	80
VIII.2.3. Drainage longitudinal .....	81
VIII.2.3.1. Dimensionnement des fossés.....	81
<b>Chapitre IX : La signalisation ferroviaire</b>	
IX.1. Introduction .....	83
IX.2. Les Objectifs de la signalisation .....	83
IX.3. Les blocks .....	83
IX.4. Les types de signalisation .....	83
IX.4.1. La signalisation lumineuse.....	83
IX.4.2. La signalisation mécanique .....	84
IX.4.3. Autres types de signalisation.....	84
IX.5. Les plaques d'identification sur les signaux .....	89
IX.6. Exemple des pancartes et les panneaux de signalisation .....	90
<b>Chapitre X : Devis quantitatif et estimatif</b> .....	91
<b>Conclusion générale</b> .....	93

## Liste des figures

Figure I.1 : Les composantes de la voie .....	3
Figure I.2 : Granulométrie du ballast utilisé par la S.N.C.F. ....	5
Figure I.3 : Essai triaxial appliqué sur le ballast .....	8
Figure I.4 : Banc d'essais BETTER.....	9
Figure I.5 : Box Test et Une courbe de tassement obtenue au cours d'un essai. ....	10
Figure I.6 : Action du bourrage : vibration, plongée et serrage (Selig and Waters 1994) .....	11
Figure II.1:Le réseau ferroviaire actuel en Algérie .....	15
Figure II.3: Plan de développement des chemins de fer en Algérie.....	17
Figure III.1:Localisation du projet de fin d'études .....	19
Figure III.2 : Les intervenants du projet.....	19
Figure III.3 : Les limites de Djelfa .....	20
Figure III.4 : Carte topographique.....	20
Figure IV.1 : Les composantes de la voie .....	23
Figure IV.2 : Le rail Vignole.....	24
Figure IV.3 : Le rail a gorge.....	24
Figure IV.4 : Le rail à double champignon .....	25
Figure IV.5: Section du rail Vignole 60E1 .....	26
Figure IV.6: Assemblage des rails par éclissage .....	26
Figure IV.7: Soudure des LRS .....	27
Figure IV.8: Les traverses en bois.....	28
Figure IV.9: Les traverse métalliques .....	28
Figure IV.10: Traverses monobloc et bi-bloc en béton.....	29
Figure IV.11:Semelle en élastomère .....	29
Figure IV.12: L'attache de type NABLA.....	30
Figure IV.13: Les éléments constitutifs d'un appareil de voie .....	31
Figure IV.14 : Conception d'appareille de voie UIC 60 1/9-190.....	31
Figure V.1 : Les éléments du tracé en plan .....	33
Figure V.2 : Diagrammes des flèches et courbures et tracer en plan d'un RP .....	35
Figure V.3 : Diagrammes des flèches et courbures et tracer en plan d'un RP d'inflexion.....	36
Figure V.4 : Courbe de raccordement et accélération non-compensée .....	36
Figure V.5 : Illustration d'un clothoïde.....	37
Figure V.6 : Force centrifuge et devers.....	38
Figure V.7 : Excès de dévers.....	41
Figure V.8 : Profil en travers type.....	47
Figure VI.1 : Les grands ensembles géologiques de l'Algérie.....	49
Figure VI.2 : Localisation de la zone d'étude dans la carte sismique de l'Algérie.....	51

---

Figure VI. 3 : Action destructive de flux d'inondation sur le remblai de l'ancienne ligne ferroviaire. ....	52
Figure VI. 4 : Chute de blocs de grès proche au PK 177+050.....	52
Figure VI.5 : Représentation des résultats des valeurs du % de fins (<#200) des échantillons).....	58
Figure VI.6 : Représentation dans la carte de plasticité des sols .....	58
Figure VI.7 : Représentation des résultats des valeurs de limite de liquidité (LL) des échantillons .....	59
Figure VI.8 : Représentation des résultats des valeurs de l'indice de plasticité (IP) des échantillons .....	59
Figure VI.9 : Représentation du % des classes de la Classification GTR (LCPC/SETRA) des échantillons .....	60
Figure VI.10 : Représentation du % des classes de la Classification UIC 719R des échantillons .....	60
Figure VII.1 : Classification du mode d'excavation des massifs rocheux (Franklin et al, 1971) .....	63
Figure VII.2 : Les différentes couches de la structure d'assises. ....	67
Figure VII.3 : L'épaisseur de la couche d'assise. ....	70
Figure VII.4 : Plan de localisation gite E4a .....	71
Figure VII.5 : Plan de localisation gite E4b .....	72
Figure VIII.1 : Carte de situation de la région d'étude .....	73

## Liste des tableaux

Tableau II.1 : Longueur du réseau ferroviaire (km).....	14
Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques du rail UIC 60.....	25
Tableau V.1 : Les longueurs minimales des alignements et des pleines courbes. ....	34
Tableau V.2 : Le rayon minimal en plan. ....	35
Tableau V.3 : Valeurs de dévers limite en fonction de la variation de dévers .....	39
Tableau V.4 : Valeurs limites d'insuffisance de dévers en fonction de la catégorie de circulations.....	40
Tableau V.5 : Valeurs limites d'insuffisance de dévers en fonction de la vitesse maximale du train.....	41
Tableau V.6 : Valeurs maximales de l'excès de dévers .....	41
Tableau V.7 : Taux de variation du dévers $\Delta d/\Delta l$ .....	42
Tableau V.8 : Valeurs limites de la variation de dévers.....	42
Tableau V.9 : Valeurs limites de la variation de dévers.....	43
Tableau V.10 : Valeurs limites de la variation de l'insuffisance de dévers.....	43
Tableau V.11 : Les paramètres significatifs de l'axe en plan.....	44
Tableau VI.1 : Résumé des unités géologiques de la zone d'étude. ....	50
Tableau VI.2 : Coefficient d'accélération de zone A (RPOA 2008).....	51
Tableau VI.3 : Résumé des Puits de reconnaissance.....	53
Tableau VI.4 : Résumé des Sondages mécaniques. ....	54
Tableau VI.5 : Résumé des essais de pénétration dynamique. ....	55
Tableau VI.6 : Résumé des résultats des essais de laboratoire. ....	57
Tableau VI.7 : Résumé des résultats des essais Proctor et CBR.....	57
Tableau VII.1 : Synthèse des valeurs de décapage moyen estimés .....	62
Tableau VII.2 : Classes de qualité des sols selon le code UIC 719R.....	63
Tableau VII.3 : Estimation du % de réutilisation des matériaux excavés dans le tronçon ayant pour base le code UIC 719R. ....	64
Tableau VII.4 : Paramètres géotechniques adoptés dans l'analyse au PK 143+450.....	65
Tableau VII.5 : Résumé les principales caractéristiques des zones de remblais. ....	65
Tableau VII.6 : Paramètres géotechniques adoptés dans l'analyse du Profil au PK 144+050.....	66
Tableau VII.7 : Volumes des terrassements. ....	67
Tableau VII.8 : Volume des couches d'assise ferroviaire. ....	67
Tableau VII.9 : Epaisseur du ballast.....	68
Tableau VII.10 : La classe de portance des plateformes. ....	69
Tableau VII.11 : Les gites d'emprunts utilisé et leur caractéristique.....	71
Tableau VIII.1 : Les 17 grands bassins hydrographiques de l'Algérie. ....	73
Tableau VIII.2 : Pluviométrie annuelle en mm.....	74

---

Tableau VIII.3 : Pluies maximales journalières (mm) .....	74
Tableau VIII.4 : Les caractéristiques des bassins versants et cours d'eau .....	75
Tableau VIII.5 : Paramètres a et b des Courbes IDF pour la région de l'étude .....	76
Tableau VIII.6 : Calcule des dimensions des dalots par itération.....	79
Tableau VIII.7 : Dimensions d'ouvrage au PK 144+075 .....	79
Tableau VIII.8 : Dimensions d'ouvrage au PK 145+900 .....	80
Tableau VIII.9 : Calcul des débits à évacuer dans le cas de remblai et de déblai.....	82

# **Introduction Générale**

## Introduction générale :

Les transports affectent le développement économique depuis le début de la civilisation humaine. Le développement économique a toujours été centré sur la confluence de systèmes de transport – les premières villes s'établirent dans les baies et ports naturels, et sur les rivières et lacs où le transport était disponible. Les Romains construisirent des routes pour unifier et permettre l'accès à leur lointain empire. Les caractéristiques géographiques telles que la proximité de la mer ou de voies d'eau, de plaines, de montagnes et l'emplacement des oasis définirent les premiers systèmes de transport (par exemple, la Route de la Soie s'est développée d'oasis en oasis, de ville en ville, où il n'y avait pas de voies d'eau ou de routes fiables). La révolution industrielle a généré de nouvelles demandes de transport, pour de plus grands volumes de charbon, de minerai de fer, et autres matériaux, ce qui a amené la construction de canaux amplifiant les transports fluviaux et le développement des premiers chemins de fer.

L'infrastructure économique d'un pays n'est certes qu'un élément de sa vie économique, mais elle constitue la charpente principale de son organisation. Pour l'Algérie, appelée à connaître un plus grand développement, on a maintes fois affirmé l'importance de cette charpente. De plus, au milieu des difficultés actuelles, elle est l'un des atouts les plus durables et les moins sujets à perturbation.

Parmi ces infrastructures on distingue le transport ferroviaire (les chemins de fer)

Les chemins de fer sont un moyen de transport efficace, qui concentre les gens et les marchandises et les transportent sur une route fixe, en utilisant une machine motrice et de multiples voitures et wagons de marchandises.

Le réseau des chemins de fer algérien a fait son apparition à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Il sert au transport de personnes et de marchandises. L'ambition des pouvoirs publics est de connecter toutes les villes d'Algérie entre elles par le réseau ferroviaire. Actuellement ce réseau est de plus de 4 576 km<sup>1</sup>, avec un programme de développement intéressant.

Le programme se divise en plusieurs régions, parmi ces régions on a la région des hauts plateaux, exactement la nouvelle ligne ferroviaire Djelfa-Bughezoul avec un linéaire de 140 km qui est en cours de réalisation.

Notre mémoire de fin d'étude consiste de faire l'étude APD de cette nouvelle ligne ferroviaire sur un tronçon de 13 km (**Pk 142+000 au Pk 155+000**).et une recherche bibliographique  
Suivant un plan de travail :

### Une recherche bibliographique : thème de master :

- L'étude de mécanisme de tassement du ballast et sa variabilité

### La partie du PFE :

- Histoire des chemins de fer en Algérie.
- Présentation du projet.
- Superstructure de la voie.
- Étude géométrique : tracé en plan, profils en long et en travers.
- Étude géotechnique.
- Terrassement et dimensionnement des couches d'assise.
- Étude hydrologique et assainissement
- Signalisation ferroviaire.
- Le devis quantitatif et estimatif.

# **Chapitre I**

## **Mécanisme de tassement du ballast et sa variabilité**

## **I.1. Introduction :**

Les voies ballastées ont été développées depuis bientôt deux siècles. La vitesse, les charges par essieux et la densité de trafic ont progressivement augmenté avec le progrès technologique. Parallèlement, les exigences de confort et de sécurité pour la voie ont également évolué ; les exigences sur la qualité du roulement, aussi. En même temps, l'augmentation des sollicitations de la voie, dues à des vitesses et à des charges plus élevées, engendrent une dégradation plus rapide de l'état géométrique et une usure accélérée des composants de la voie. Cela a pour effet un plus grand besoin d'entretien et une diminution de la durée de vie de certains composants de la voie.

Cela a pour effet un plus grand besoin d'entretien et une diminution de la durée de vie de certains composants de la voie. Les tassements discontinus et différentiels de la voie sont devenus plus fréquents, entraînant une forte augmentation des coûts d'entretien et, dans certains cas, des renouvellements précoces.

Dans le cadre de ce travail du master, nous nous sommes intéressés au problème du tassement du ballast et sa variabilité, et il s'articule autour des axes principaux suivants :

- Définition de la voie ferrée ballastée et ses composantes,
- Définition des efforts de la voie (verticaux, latéraux et longitudinaux)
- Defaults de la voie,
- Etude de tassement du ballast et son traitement.
- Conclusion

## **I.2. La voie ferrée ballastée :**

### **I.2.1. La voie :**

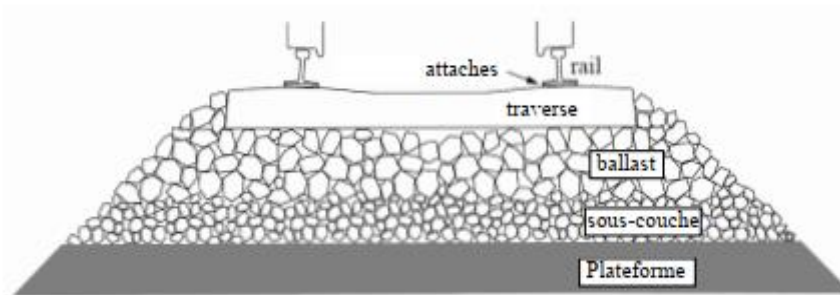
La voie ferrée est une structure composée de différents constituants qui permet la circulation des trains et supporte les différents types de sollicitations transversales, longitudinales et verticales, Les efforts transversaux et verticaux entraînent des déformations irréversibles (tassement vertical et étalement horizontal) de la voie, Les efforts longitudinaux (accélération et freinage) restent moins importants.

Les caractéristiques de la voie sont fixées par des règles normalisées définissant des exigences géométriques et mécaniques pour assurer au mieux la qualité homogène de la voie.

La voie à grande vitesse a un écartement standard de 1.435 m entre les deux files de rails. La plateforme qui concerne deux voies est la structure d'assise sur laquelle la voie repose. La plateforme est constituée de sol rapporté dans le cas d'un remblai ou de sol en place dans le cas d'un déblai. Sa qualité dépend de la nature géotechnique du sol et des conditions géologiques et hydrologiques locales.

### **I.2.2. Composants de la voie :**

Les constituants de la voie ballastée peuvent être classifiés en deux groupes principaux : l'armement composé des rails, des semelles absorbantes, des attaches et des traverses, et les structures d'assises constituées du ballast et des sous-couches sur lesquelles il repose. L'armement assure entre autres la fonction de transmission des efforts aux structures d'assises . L'épaisseur de ballast sur LGV est en général comprise entre 30 et 40 cm sous les traverses [1].



**Figure I.1 : Les composantes de la voie**

- ✓ **Les rails :** Les rails sont les constituants longitudinaux en acier en contact avec les roues des véhicules. Leur fonction est de guider le train et d'assurer la transmission des charges ponctuelles aux traverses.
- ✓ **Les attaches rails-traverse :** Les attaches rail-traverse assurent la fixation du rail sur la traverse et résistent aux mouvements verticaux, latéraux et longitudinaux du rail. Il existe plusieurs types et techniques d'attache, selon le type de traverses [2].
- ✓ **Les traverses :** Les traverses transmettent les efforts à la structure d'assise. Elles permettent aussi de maintenir l'écartement des deux files de rail et de garder l'inclinaison du rail, laquelle est de l'ordre de  $1/20$  [1].

### **I.2.3. Les sollicitations :**

Ils existent des forces dans la direction verticale, latérale et longitudinale qui s'appliquent sur la voie. Ces forces sont dues au trafic et aux changements de température.

#### ✓ **Efforts verticaux :**

La force verticale est une combinaison des surcharges statiques et dynamiques. La charge statique est constituée par le poids du train et de l'armement (les rails, le système de fixation et les traverses). Les charges dynamiques dépendent des caractéristiques de la voie, du véhicule, des conditions d'opération et des conditions environnementales [1]. Il est possible de classer les voies en fonction des charges de circulation. Ce classement des voies fait par l'Union Internationale des Chemins de Fer (U.I.C.) se divise en trois catégories :

- catégorie A, 16 tonnes par essieu,
- catégorie B, 18 tonnes par essieu,
- catégorie C, 20 tonnes par essieu,

L'augmentation de la charge par essieu et de la vitesse sont des éléments importants influant sur la vitesse de dégradation de la voie, et donc les coûts de maintenance.

#### ✓ **Efforts latéraux :**

Les efforts latéraux s'exercent dans une direction parallèle à l'axe principal des traverses. Ces efforts proviennent des charges latérales apportées par les roues. Ces forces sont provoquées par le contact roue-rail, particulièrement pendant les virages, du fait de la présence de la force centrifuge.

#### ✓ **Efforts longitudinaux :**

Les forces longitudinales sont parallèles aux rails. Ces forces sont produites soit par l'effet d'accélération et de freinage, soit par la dilatation et la contraction thermique des rails.

Les efforts statiques et dynamiques exercés par les véhicules et les imperfections de la voie provoquent des fluctuations lors de la circulation des véhicules. Ces variations ont différentes origines : comme les irrégularités horizontales et verticales de la voie, les discontinuités aux raccordements non soudés, les franchissements d'appareil de voie et les irrégularités de la surface de roulement du rail ou des roues des véhicules. Ces irrégularités agissent sur la dégradation de la voie.

#### **I.2.4. Les Défauts de la voie :**

##### **- Les types de défauts :**

Le trafic ferroviaire entraîne différents types de chargements, dû à des différences entre fréquence et tonnages, reçus directement par la couche de ballast.

À partir de cette transmission des efforts, se génèrent des défauts dans la géométrie du nivellement de la voie.

On distingue des défauts sur le plan vertical et horizontal. Dans le plan vertical, on définit le nivellement longitudinal (NL), qui est fonction du tassement global et du tassement résiduel. En pratique, le NL est défini par l'écart-type sur 200 m de voie du nivellement longitudinal de la plus mauvaise des files de rail, le nivellement longitudinal étant mesuré sur une base de 15 m.

Dans ce même plan, on distingue également le nivellement transversal que l'on évalue selon deux quantités :

- 1. L'écart de dévers, qui représente l'inclinaison transversale de la voie dans les courbes pour équilibrer les efforts.
- 2. Le gauche ou torsion de la voie, qui représente le décalage vertical entre les deux files de rails.

Les défauts apparaissant dans le plan horizontal sont caractérisés selon deux types : le défaut de dressage qui représente la variation transversale du milieu des rails par rapport à sa position théorique, et le défaut d'écartement des rails entre eux. La mesure et l'analyse de ces défauts conduisent à déterminer l'état de la voie selon des tolérances de sécurité admises et à planifier les opérations d'entretien. En fonction du type de circulation de la ligne, on définit des seuils dont le dépassement peut entraîner des réductions de vitesse ou des opérations de maintenance urgentes.

D'autres types de défauts peuvent apparaître, notamment celui appelé « traverses » ou « plage de danse ». En effet des instabilités locales ou défauts géométriques déjà présents sur la voie peut créer des vides entre la couche de ballast et la traverse, le blochet ou les deux. Au passage des véhicules, la traverse vient taper le ballast, cela étant senti comme un choc anormal par les conducteurs. Ces chocs entraînent une usure de la traverse et du ballast

#### **I.3. Le ballast :**

C'est l'élément qui résiste à la plupart des efforts exercés sur la voie. Le ballast est un granulat  $d=D = 25=50 \text{ mm}$  provenant du concassage de roches extraites dans des carrières de pierres dures (granit, diorite, rhyolite, porphyre, quartzite...). Sa couche doit être compactée, lors de la mise en place de la voie, afin d'améliorer la stabilité du ballast. L'épaisseur minimale de cette couche pour les lignes à grandes vitesses est 30 cm.

### I.3.1. Le rôle du ballast :

Le ballast a un rôle très important, il remplit les fonctions suivantes :

- La transmission et la répartition des efforts à la plate-forme dues aux charges statiques et dynamiques des circulations,
- L'absorption des vibrations mécaniques et acoustiques,
- L'ancrage latéral et longitudinal de la voie
- Le drainage des eaux pluviales,
- Une maintenance et une mise en place de la voie plus aisées [2].

### I.3.2. Les caractéristiques du ballast

L'ensemble des fonctions remplies par le ballast nécessite de définir des critères de qualité, qui sont définis dans la norme européenne « NF EN 13450 ». Les critères de qualité du ballast portent sur la granulométrie, la dureté, la forme et la propreté :

**Granulométrie :** Les fuseaux de spécification et de refus du ballast employé sur les lignes ferroviaires actuelles sont représentés sur la figure. Les deux fuseaux représentent respectivement la spécification du ballast préconisée par la norme et les valeurs limites au-delà desquelles le ballast est refusé. Le deuxième fuseau est établi suite à des contrôles de conformité à la norme.

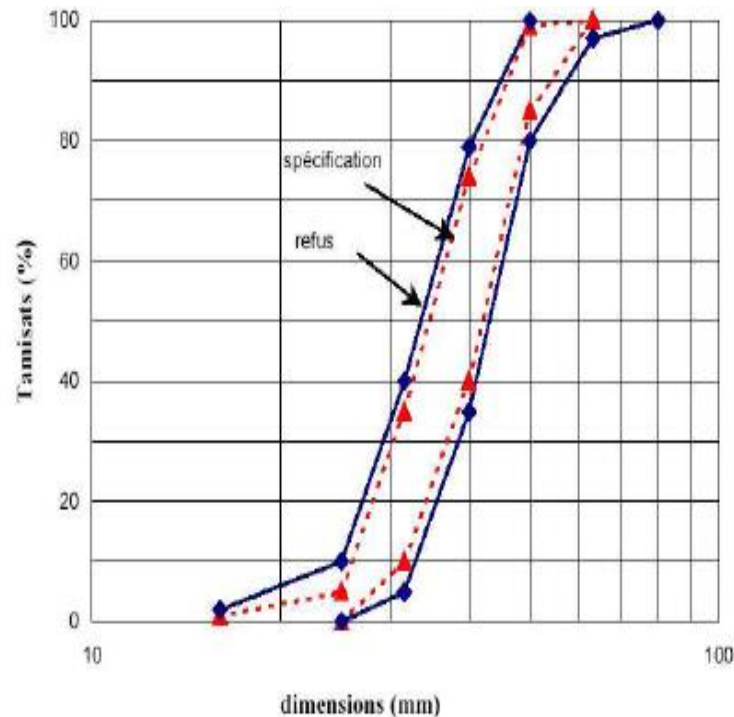


Figure I.2 : Granulométrie du ballast utilisé par la S.N.C.F [7].

**Dureté :** La dureté et la résistance à l'usure des grains de ballast sont définies à l'aide de l'essai Los Angeles et l'essai d'attrition Micro-Deval en présence d'eau.

**Forme :** Les grains de ballast sont de forme polyédrique avec des arêtes vives. La présence de grains allongés nuit à la stabilité de la couche compactée du fait de la possibilité d'attrition de ses particules. Des particules comme les aiguilles et les éléments plats ne doivent pas dépasser 92 mm. Le pourcentage en masse d'aiguilles ne doit pas excéder 7%. Les éléments plats sont caractérisés par un coefficient d'aplatissement global qui représente le pourcentage total en

masse de passant à l'ensemble des grilles et ne doit pas dépasser 12%. L'homogénéité du ballast est définie par la proportion d'éléments friables ou altérés qui ne doit pas dépasser 3%.

**Propreté :** Les grains de ballast doivent être expurgés du sable, de la terre, des poussières, des débris et des fines pouvant influencer la rugosité et le frottement entre grains qui sont à l'origine de la résistance macroscopique. La masse relative des éléments passant au tamis de 1.6 mm doit être inférieure à 0.5%.

La norme fixe aussi les exigences pour les grains de ballast pour :

- La durabilité, déterminée par la résistance aux cycles de gel, dégel, le coefficient d'absorption d'eau.
- Le coup de soleil, qui est un type de dégradation de roches présente dans certains basaltes, caractérisée par l'apparition de fissures très fines engendrant une perte de la résistance de la roche.
- Les composants nocifs.

#### **I.4. Étude de tassement du ballast :**

Quand la voie ferrée est chargée par le poids du train, le ballast peut subir une déformation non élastique. Dès que la voie est déchargée, elle ne revient pas exactement à sa position initiale mais à une position près de celle d'origine. Après plusieurs cycles de chargements dus aux passages des trains, les petites déformations non élastiques se seront accumulées dans les parties différentes de la voie qui vont avoir de nouvelles positions. Ce phénomène est appelé le tassement du ballast. Le tassement se produit donc par le chargement cyclique et sa sévérité dépend de la qualité et du comportement du ballast.

##### **Le tassement du ballast apparait en deux phases :**

- Directement après le bourrage, c'est l'étape de densification du ballast. Le tassement est relativement rapide jusqu'à ce que le ballast devienne bien compacté ;
- La deuxième phase du tassement est plus lente que la première phase et la relation entre le tassement et le temps (nombre de cycles de chargement) est plus ou moins linéaire.

Cette deuxième phase est la phase intéressante et le tassement peut être causé par plusieurs mécanismes de comportement du ballast :

- La continuation de la densification du ballast (après la première phase) dû au réarrangement des grains produit sous le passage des trains ;
- La pénétration de sol entre les grains de ballast réduit la hauteur de la couche de ballast et par suite change la position de la voie.
- La réduction du volume de ballast due à la détérioration des grains de ballast sous l'action de la charge mobile et des facteurs de l'environnement tels que le gel et la pluie. Les grains de ballast peuvent se diviser en deux ou plusieurs parties ce qui favorise la réduction de volume de la couche de ballast.
- Les fortes contraintes qui se localisent aux points de contact entre les grains font changer la forme des grains, ils deviennent moins anguleux ce qui réduit le volume occupé par le ballast.
- Le comportement non élastique après déchargement qui à cause de glissements entre les grains de ballast sous chargement, fera que la déformation ne disparaîtra pas totalement après déchargement.
- La migration des grains de ballast qui se trouvent sous le blochet vers des régions moins chargées favorise l'enfoncement du blochet dans le ballast.

- Les mouvements latéral et/ou longitudinal des traverses peuvent causer la sortie des grains de ballast situés sous la traverse et par suite faire enfoncer la traverse de plus en plus dans le ballast.

En bref, le tassement du ballast peut être produit par deux raisons essentielles : la densification du ballast et le comportement non élastiques du ballast.

#### I.4.1. Approches expérimentales :

La plupart des lois de tassement sont déterminées empiriquement grâce à des essais à échelle réelle ou réduite (au laboratoire) plus ou moins compliqués. Elles visent généralement la deuxième phase du tassement qui est plus ou moins linéaire. La première phase n'est pas intéressante et très difficile à déterminer car sa durée en nombre de cycles dépend fortement du bourrage.

##### a) Essais triaxiaux

L'essai à l'appareil triaxial consiste à soumettre une éprouvette de ballast à une pression de confinement latéral ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) et à une contrainte d'écrasement répétée  $\sigma_1$ . La pression de confinement latéral peut être appliquée par le vide ou l'eau. L'éprouvette de forme cylindrique est maintenue par une membrane de latex permettant les déformations latérales et la conservation de la contrainte maximale ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ). L'essai triaxial permet de simuler un signal périodique (**sinusoïdal**) et de caractériser le comportement en déformation du ballast avec pour objectif d'adapter une relation aux applications ferroviaires [3].

Shenton (1978) et Hettler (1987) ont déduit grâce à des essais avec un appareil triaxial, la loi de tassement qui est de la forme suivante :

$$\tau_N = \tau_1 [1 + C_N \ln N]$$

Où :

$C_N$  : est une constante.

$\tau_1$  : est le tassement obtenu au premier cycle de chargement et

$\tau_N$  : est le tassement au cycle N.

Le ballast utilisé par Shenton a une granulométrie qui s'étale de 13 à 38 mm pour une cellule triaxiale de 230 mm de diamètre et une hauteur inférieure au double du diamètre. Hettler utilise un ballast 25/50 mm et une cellule de 780 mm de diamètre et 450 mm de hauteur. Soulignons que les essais triaxiaux sont convenables pour des milieux granulaires fins tels que le sable et l'argile, les résultats obtenus sur le ballast avec ce type d'essais peuvent être perturbés.



**Figure I.3 : Essai triaxial appliqué sur le ballast**

### **b) Les modèles à échelle réduite**

Guérin [4] a travaillé sur la conception d'un modèle à échelle réduite pour l'identification expérimentale d'une loi de tassement. Cette expérience appelée MICROBALLAST est une maquette d'une portion de voie. Elle est constituée par du ballast respectant le fuseau granulométrique utilisé par la SNCF mais à une échelle un tiers. Le même rapport a été employé pour la magnitude du chargement appliqué. La rigidité du sol simulé est comprise entre 45 et 100 MPa. Cette rigidité peut varier grâce à l'utilisation d'un élastomère de différentes épaisseurs. La maquette est constituée par une caisse d'une hauteur de 400 mm et de section  $500 \times 500 \text{ mm}^2$ , avec une couche de ballast de 100 mm sous le blochet, lequel est modélisé par une pièce cylindrique en acier.

Les résultats jusqu'à 800000 cycles mettent en évidence une évolution en deux phases du tassement en fonction du nombre de cycles. La première phase correspond à la densification de la structure ballast, qui dépend de la qualité du bourrage. La deuxième phase correspond au comportement à moyen terme. Cette phase est caractérisée par un incrément du tassement en millimètres par cycle ( $d\tau/dN$ ) constant et par une stabilisation de l'amplitude de la déflexion élastique  $\delta$  du système. Guérin propose une loi de puissance pour le taux de tassement :

$$(d\tau/dN) = \alpha \delta^\beta$$

Avec  $\alpha \approx 1.437 \cdot 10^{-6}$  et  $\beta \approx 2.51$ . Le paramètre  $\alpha$  semble interpréter la densification de la structure du ballast. Ce paramètre évolue avec l'assemblage granulaire, qui reste constant lorsqu'on arrive à la densité maximale du ballast sous un niveau de chargement spécifié.

Après Guérin, Bodin (2001) propose deux lois de tassement vertical et latéral de la même forme que la loi précédente. Celles-ci ont été identifiées expérimentalement sur un banc d'essai nommé BETTER (Ballast : Essai de Tassement Transversale à Échelle Réduite) a été mis au point. Cet essai avait pour but de caractériser le comportement du ballast sous sollicitation combinée (verticale et horizontale). Il reproduit à échelle 1/3 une portion de voie ballastée entourant une traverse bi-bloc en béton. Cette traverse bi-bloc est posée sur 10 cm de microballast contenu à l'intérieur d'une boîte parallélépipédique de dimensions  $1.7 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ . Les chargements ont été appliqués par un vérin dont on peut faire varier l'inclinaison entre  $0^\circ$  et  $30^\circ$ . Les essais réalisés ont été partagés entre des essais quasi-statiques à faible nombre de cycles et des essais cycliques à grand nombre des cycles (ou essais de fatigue 1.4).

Les résultats obtenus mettent en évidence le lien entre l'incrément de tassement et la déflexion verticale  $\delta$ . La loi de tassement verticale établie pour le banc d'essai BETTER est la suivante :

$$d\tau/dN = 2.1.10^{-6} \delta^{1.17}$$

Ces paramètres sont comparables à ceux trouvés par Guérin.



**Figure I.4 : Banc d'essais BETTER [3].**

### c) Box test

Ce type de test fait partie de modèles à échelle réelle, afin d'étudier les phénomènes que se produisent dans cette portion de voie. Une boîte a été conçue pour simuler un échantillon de ballast pendant sa mise en service, les sollicitations dues au trafic et les opérations de maintenance. Cette boîte a pour dimensions 700 mm de longueur, 300 mm de largeur et une hauteur de 450 mm L'épaisseur de la couche de ballast est de 300 mm Le matériau a été soumis à un chargement sinusoïdal, avec une amplitude minimale de 3 kN et maximale de 40 kN, pour un nombre total de cycles de 1 million et une fréquence de 3 Hz. Cette étude a permis de vérifier l'augmentation de la rigidité du système et la réduction des incréments de tassement après chaque cycle de bourrage.

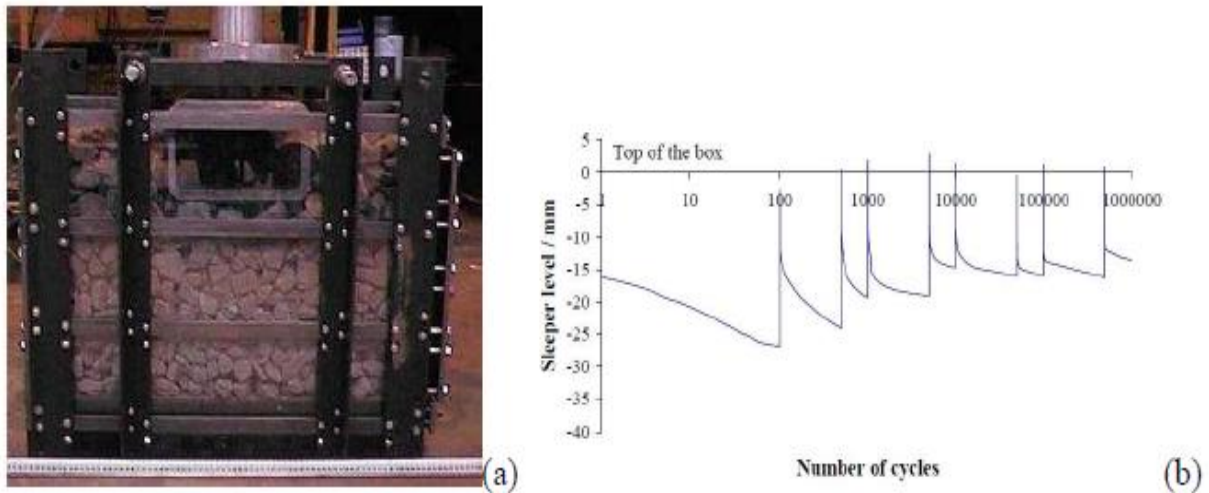


Figure I.5 : Box Test et Une courbe de tassement obtenue au cours d'un essai [5].

#### I.4.2. Approches numériques :

Deux approches numériques peuvent être envisagées : l'approche par la méthode des éléments finis, adoptée pour les milieux continus, et l'approche par éléments discrets pour la simulation de la dynamique des particules.

##### a) Approche milieu continu : méthode par éléments finis

La modélisation par éléments finis a été l'une des premières approches numériques utilisées dans le domaine de la voie ballastée. Ces modélisations avaient pour objectif de prédire l'évolution de la géométrie de la voie produite par le chargement cyclique. Les éléments finis ont permis de dimensionner les couches d'assise de la voie en fonction de la qualité du sol support, en termes de densité et de module d'élasticité.

##### b) Approche par la méthode des éléments discrets

Comme nous l'avons exposé dans le paragraphe précédent, les modèles par éléments finis sont très utilisés dans le domaine ferroviaire pour l'étude du comportement de la voie, mais ils présentent des inconvénients majeurs dans le cas du ballast où ce type d'outil ne tient compte ni de sa nature granulaire, ni des caractéristiques propres des particules, ni de son arrangement. Les méthodes par éléments discrets ont la particularité de traiter chaque grain comme un corps rigide ou déformable avec un nombre fini de degrés de liberté. Cette approche donne ainsi accès aux vitesses des grains et aux efforts de contact au cours du tassement du ballast.

#### I.5. Variabilité de la déformation du ballast : tassement différentiel :

Un aspect qui n'a pas été traité de manière directe dans les études de l'évolution du tassement, menées par des approches expérimentales ou numériques, c'est la variabilité de la réponse, en termes de tassement du ballast. Cette variabilité a des origines différentes :

- D'une part, les irrégularités de la voie vont générer des fluctuations des efforts statiques et dynamiques, lors de la circulation des véhicules.
- D'autre part, du fait que l'épaisseur de la couche de ballast est constituée par environ une dizaine de diamètres des grains, le tassement est très sensible aux détails de l'arrangement des grains.

Ce constat nous apprend qu'il ne suffit pas de donner une loi de l'évolution du tassement mais qu'il est important de donner une loi probabiliste de tassement qui peut également

s'exprimer sous la forme d'une loi de tassement moyen avec une variabilité qui évolue en fonction d'un fuseau de tassements, prenant en compte l'évolution de la distribution des tassements en fonction du tonnage [3].

## I.6. les solutions envisageables pour ce phénomène de tassement :

### I.6.1. Correction de la géométrie par bourrage-nivellement-dressage :

Le bourrage-nivellement-dressage est une procédure d'entretien de la voie qui permet de restaurer la position géométrique correcte de la voie. Il est réalisé par des machines munies de pioches qui plongent dans le ballast encadrant les traverses. Le processus de bourrage se déroule en deux étapes : d'une part le soulèvement et repositionnement correct d'une portion de la voie dans les trois directions, et d'autre par l'action simultanée de vibration et réarrangement du ballast autour et au-dessous des traverses (Figure I.6).

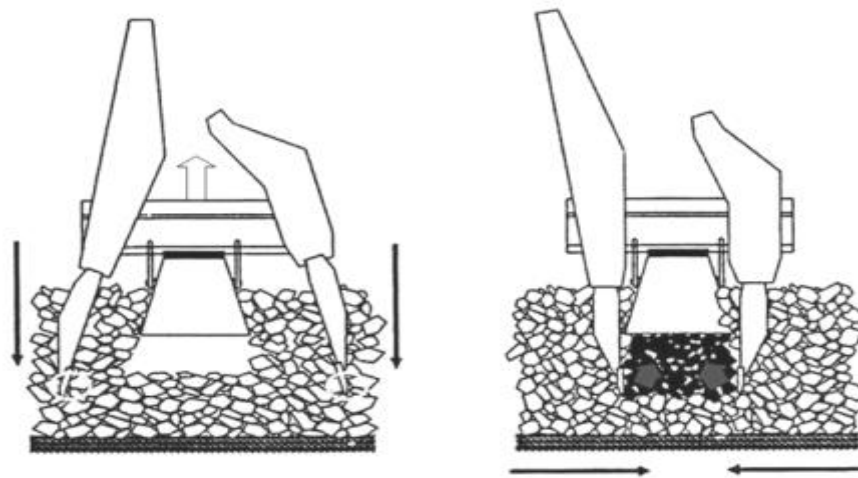


Figure I.6 : Action du bourrage : vibration, plongée et serrage (Selig and Waters 1994)

D'ailleurs, le processus comporte une perte de compactage du ballast, ainsi que de stabilité latérale. Ces pertes sont particulièrement dangereuses dans les courbes. Elles doivent ainsi être récupérées pour garantir la sécurité du trafic : trois solutions différentes existent.

- ✓ La stabilisatrice dynamique applique aux rails, par l'intermédiaire de galets à boudins, des vibrations horizontales à 35 Hz, combinées à une charge verticale statique qui est transmise à la couche de ballast (Plasser and Theurer 1993).
- ✓ La dameuse utilise une technique différente : la vibration est appliquée directement à la surface du ballast, en correspondance des cases, des banquettes et aux épaulements, par l'intermédiaire de plaques. En plus de compacter le ballast, elle restaure son profil latéral (UIC 2008).
- ✓ En absence de l'une de ces deux machines, les premières 100.000 TBC2 de trafic doivent circuler à une vitesse réduite de 80 km/h, avec des évidentes conséquences négatives sur la capacité de la ligne [6].

**I.7. Conclusion :**

Le système de la voie ferrée ballastée est constitué de trois éléments interagissant entre eux : la superstructure, l'infrastructure et le matériel roulant.

Avec le progrès, les composants de la superstructure ont évolué pour garantir des performances de plus en plus élevées. Durant la même période, la vitesse, la charge cumulée annuelle, et les charges par essieux ont augmenté avec le temps.

La charge du trafic engendre une dégradation irrégulière de la géométrie, et une diminution de la durée de vie des composants de la voie qui est provoquée par le tassement du ballast avec comme effet un besoin de maintenance. L'opération de bourrage permet de corriger rapidement la géométrie de la voie, mais en même temps, détruit peu à peu les particules du ballast.

La voie entre dans un cercle vicieux dont la dégradation d'un élément provoque des surcharges dynamiques et une accélération de dégradation du reste du système. La durabilité de la géométrie diminue, et ainsi l'efficacité du bourrage. Au bout d'un certain nombre d'années, le ballast a perdu toutes ses propriétés, il ne peut plus assumer son rôle et doit être remplacé.

Les coûts de maintenance du ballast représentent environ le 30% du budget alloué annuellement à la maintenance de la voie.

## Références bibliographiques

- [1] ALIAS, J. (1984). La voie verrée. Paris
- [2] Gilles Saussine. Contribution à la modélisation de granulats tridimensionnels : application au ballast (2004).
- [3] Juan Carlos Quezada. Mécanismes de tassement du ballast et sa variabilité.
- [4] N. Guerin. Approche expérimentale et numérique du comportement du ballast des voies ferrées (1996).
- [5] W.L. Lim. Mechanics of Railways Ballast Behaviour. PhD thesis, The University of Nottingham, mai 2004
- [6] Comportement du ballast sous l'action du bourrage et du trafic ferroviaire THÈSE NO 4697 (2010)
- [7] la norme européenne NF EN 13450 (août 2003). Cette norme remplace à partir de janvier 2004 la norme française NF F53 - 695.

# **Chapitre II**

## **Chemin de fer en**

### **Algérie**

## II.1. Introduction :

Le réseau des chemins de fer algérien a fait son apparition à la fin du xix<sup>e</sup> siècle. Il sert au transport de personnes et de marchandises. L'ambition des pouvoirs publics est de connecter toutes les villes d'Algérie entre elles par le réseau ferroviaire. Actuellement ce réseau est de plus de 4 576 km.

## II.2. Histoire de construction du chemin de fer en Algérie :

### II.2.1. Pendant la colonisation française :

L'histoire des chemins de fer d'Algérie commence le 8 avril 1857, avec un décret du gouvernement français qui autorise la construction de 1 357 km de chemins de fer dans la colonie d'Algérie.

Le premier chantier, démarré le 12 décembre 1859, porte sur la construction de la ligne Alger-Blida dans la Mitidja

Objectif des 1 357 km est atteint et même dépassé, avec des tronçons construits représentant 1365 km de voie et touchant presque toutes les villes importantes d'Algérie.

En 1876 roulent des trains de nuit.

Dans les 30 ans qui suivirent, 2 035 km de lignes de chemin de fer vont s'ajouter au réseau, constituant l'armature du futur réseau ferroviaire algérien.

Entre 1907 et 1946 une 3<sup>ème</sup> campagne d'investissement ajoute 1 614 km au réseau.

Au début de l'année 1925 on comptait 4724 km de chemins de fer auxquels il faut ajouter 127 km de tramways

En 1941 le Transsaharien relie l'Afrique noire à la Méditerranée.

A la fin de la Seconde Guerre Mondiale le réseau ferroviaire algérien s'étend sur plus de 5 000 km.

Au cours des dernières années, le réseau s'est entièrement modernisé grâce surtout à l'emploi systématique de la traction diesel. Les voies ont été renforcées, la signalisation transformée, la vitesse et le confort des trains considérablement améliorés.

Le 30 juin 1959 l'État français et l'OCFA signent une convention créant la Compagnie des Chemins de Fer Français en Algérie (CCFA) qui devient en 1963 la SNCFA (Société Nationale des Chemins de Fer Algériens).

### II.2.2. Après l'indépendance de l'Algérie :

Après l'indépendance du pays et par Décret no 63-183 du 16 mai 1963, la Société nationale des chemins de fer français en Algérie change de statut et de nom, et devient la Société nationale des chemins de fer algériens (SNCFA). Elle débarquait le 25 mars 1976 et remplacée notamment par la Société nationale des transports ferroviaires (SNTF)

Dans les années 1990, le réseau ferroviaire algérien ne mesure que 3572 km à cause de suppression de la différente ligne ferroviaire, soit 30% de moins qu'en 1945 et à peine autant qu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle.

Le 31 mars 1976 à la fin de la concession de l'État français, l'État algérien divise la SNCFA en trois organismes distincts, La Société nationale des transports ferroviaires (SNTF), la

société nationale d'études et de réalisations de l'infrastructure ferroviaire (SNERIF) et la société d'engineering et de réalisation des infrastructures ferroviaires (SIF).

Un nouveau programme d'investissement permet la réalisation de 203 km de nouvelles lignes, le doublement de 200 km de voie sur la rocade nord et le renouvellement de 1 400 km de voie et ballast.

En 1986, la crise financière poussera à la dissolution de la SNERIF et de la SIF dont les prérogatives sont reprises par la SNTF qui changera de statut en 1990 pour devenir une EPIC. À la fin des années 1990, la SNTF exploite un réseau de 3 500 km.

En 2005, l'agence nationale d'études et de suivi de la réalisation des investissements ferroviaires (ANESRIF) est créée pour gérer un nouveau programme d'investissement public avec l'objectif de porter le réseau à 12 500 km en 2025.

En 2010, 315 km de nouvelles voies sont ouvertes (Bordj Bou Arreridj à M'Sila, Ain Touta à M'Sila, nouvelle ligne de Béchar), les lignes de banlieue d'Alger ont été électrifiées.

En 2015, sur un programme de 2 300 km de nouvelles lignes, 1 324 km sont en travaux dont la majeure partie concerne la partie ouest de la boucle des hauts plateaux.

Le 13 octobre 2019, mise en service d'une nouvelle ligne reliant Alger à Touggourt. Elle est desservie par un train de longues distances offrant des compartiments couchettes de 1ère et 2ème classe.

**Tableau II.1: Longueur du réseau ferroviaire (km) [1].**

Année	1996	1999	2002	2004	2005	2006	2008	2013
<b>Chemin de fer (km)</b>	<b>4820</b>	<b>4820</b>	<b>3 973</b>	<b>3 973</b>	<b>3 973</b>	<b>3 973</b>	<b>3 973</b>	<b>4573</b>

La diminution du linéaire du réseaux de chemin de fer a cause de suppression des plusieurs tançons ferroviaire.

### **II.3. Le réseau ferroviaire national actuel :**

Le réseau ferroviaire national est placé sous l'autorité de la Société nationale des transports ferroviaires, un établissement étatique à caractère Industriel et Commercial. Son capital social s'élève à 20 701 millions DA, actuellement ce réseau est de 4498Km dont :

- Longueur des lignes en exploitation : 3750Km.
- Longueur des lignes en double voie : 553Km.
- Longueur des lignes en voie unique : 3217Km.
- Longueur des lignes électrifiées : 323Km.
- Nombre de gares en exploitation : 175.
- Nombre de haltes en exploitation : 215.
- Nombre d'Ouvrages d'Art dont l'ouverture est supérieure à 10 m : 553.
- Nombre d'Ouvrages d'Art dont l'ouverture est inférieure à 10 m : 5279.
- Nombre de tunnels : 139.
- Longueur des tunnels : 40Km.
- Nombre de passages à niveau gardé : 267.
- Nombre de passages à niveau non gardé : 959.

D'après la classification mondiale des chemins de fer effectuée par CIA (central intelligence agency ) en 2008 :

L'Algérie est classée à la 45e place sur 134 pays au monde et occupe la 6e place au niveau africain, ainsi qu'elle est la première par rapport aux pays maghrébins.



**Figure II.1:Le réseau ferroviaire actuel en Algérie**

#### **II.4. Plan de développement :**

Ce programme comporte des opérations de renouvellement des voies existantes, et de renforcement des ouvrages d'art anciens (ponts et tunnels), la création de lignes nouvelles, l'extension de capacité des installations existantes pour l'amélioration des débits des lignes,

L'Algérie se dote de plusieurs nouvelles lignes ferroviaires. Un peu partout, des projets sont en cours de réalisation.

Au total, 1116 kilomètres de chemins de fer sont actuellement en chantier dans le cadre du programme de densification et de modernisation du réseau. Certains sont déjà achevés, ou presque. D'autres sont en phase d'études voire la **Figure II.2**. Et dans ce programme on trouve :

**II.4.1. Rocade Nord et ses dessertes :**

- 1.822 Km de linéaire (1.250 km d'Annaba à Akid Abbes et 572 km linéaire des dessertes).
- 22 Wilaya desservies, représentant plus de 20 Millions d'habitants (Environ 50% de la population globale).
- 216 Gares et Haltes.
- 09 Grands Ports raccordés et à raccorder.

**II.4.2. Rocade des Hauts Plateaux :**

- 1.160 km de linéaire (532 km en exploitation et 628 Km à 160 km/h en cours de réalisation)
- 10 Wilaya desservies, représentant environ 07 Millions d'habitants (Environ 20% de la population globale)

**II.4.3. Ligne Minière Est : 588 km :**

- Etude de la nouvelle ligne ferroviaire entre Djebel El Onk et El Oued : 200 km
- Etude de Dédoublment, Modernisation et/ou rectification du tracé pour augmenter le trafic de la ligne minière EST (Annaba /Djebel-Onk) : 388 km
- Signalisation, télécommunications et énergie 230 km, 31 Gares, ainsi que le renouvellement des voies et ADV et remaniement de la gare de Souk Ahras.
- Travaux d'électrification Annaba (gare maritime) - Poste II (El Hadjar), Drean – Bouchegouf, Souk Ahras-Oued Kébrit, Oued Kébrit – Ouenza, Ain Chenia-Boukhadra : 131 km.
- Lancement des travaux de Dédoublment, Modernisation et/ou rectification du tracé pour augmenter le trafic de la ligne minière EST de 388 km (Annaba /Djebel-Onk).

**II.4.5. Pénétrante Ouest, Est et Pénétrante centre :**

- Modernisation pour une vitesse moyenne de 160 km/h dans l'ouest
- 90 km de ligne nouvelle à 220 km/h en travaux et 86 km de ligne nouvelle en étude dans le centre
- Modernisation pour une vitesse moyenne de 160 km/h dans l'Est
- Extension de la ligne vers Hassi Messaoud à une vitesse de 220 km/h
- Signalisation et Télécommunications

**II.4.6. Boucle Sud-Est et Sud-Ouest :**

- 425 km de ligne nouvelle à 220 km/h en études Sud-Est



# **Chapitre III**

## **Présentation du projet**

### III.1. Introduction

Le transport est un secteur clé pour le développement d'un territoire donné. En effet, dans une économie moderne, le transport joue un rôle prépondérant car, non seulement il facilite les échanges entre les agents économiques, mais également améliore la circulation des personnes et des biens, des idées et des services, ainsi que la solidification des liens d'amitié et de fraternité entre les citoyens.

Dans le cadre du développement du réseau ferroviaire d'Algérie parmi lesquels la réalisation de la rocade ferroviaire des hauts plateaux.

### III.2. Description de projet

Le projet est la réalisation du tronçon n°1 de la nouvelle liaison ferroviaire entre les villes de **Boughezoul** et **Djelfa** sur **140 Km**, qui s'inscrit dans le cadre de la nouvelle ligne ferroviaire reliant les villes de **Boumedfaa** et **Laghouat**.

Les caractéristiques techniques du projet :

- Longueur totale du projet : **139+982 km** du **PK 104+418** (Boughezoul) au **PK 244+400** (Djelfa)
- Nombre de lots : **7 lots** d'environ 20 km de longueur chacun
- Nombre de voies : voie unique avec possibilité de duplication dans le futur
- Gares de voyageurs :
  - **Gare Ain Oussera** : (Pk 137+409 au Pk 139+554)
  - **Gare Hassi Bahbah** : (Pk 185+275 au Pk 187+350)
- Gares de croisement : **PK 123+420**, **PK 156+800** et **PK 214+070**
- Nombre d'ouvrages d'art : quarante-trois (**43**) ouvrages d'art dont cinq (**05**) viaducs, (**20**) passages supérieurs, (**08**) passages inférieurs, (**02**) passages supérieurs à faune, (**06**) passages inférieurs à faune, (**01**) pont rail et (**01**) pont cadre.
- Tunnels : 3 tunnels au lot N°7 du projet :
  - **Tunnel N°1** : du **PK 227+200** au **PK 227+800**, (620 m)
  - **Tunnel N°2** : du **PK 232+600** au **PK 233+400**, (813 m)
  - **Tunnel N°3** : du **PK 234+075** au **PK 234+825** (750 m)

### III.3. Localisation du projet de fin d'études :

Notre projet consiste une étude (APD) concernant une partie du Lot 3 (Pk 142+000 au Pk 155+000) sur 13 km de la nouvelle liaison ferroviaire entre les villes de Boughezoul et Djelfa sur 140 Km

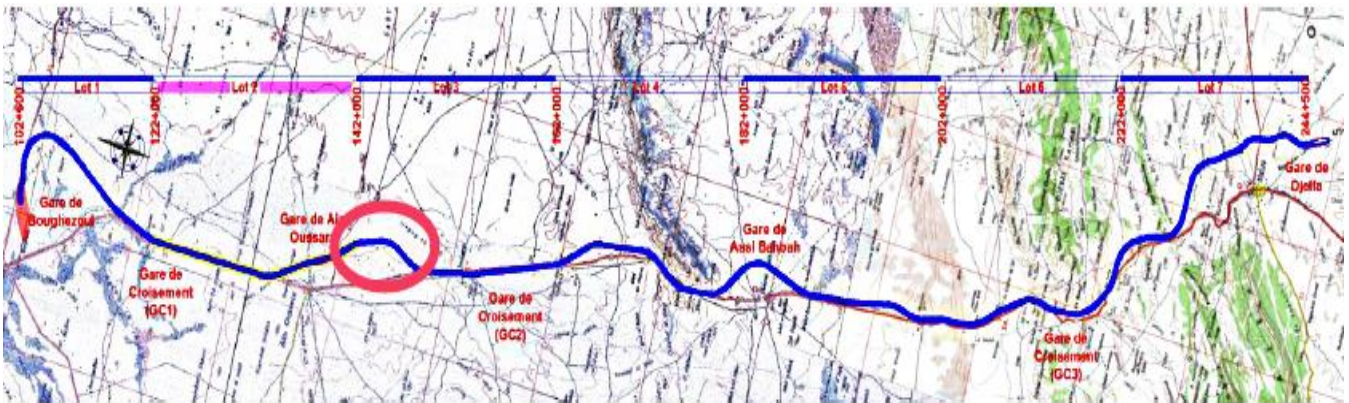


Figure III.1: Localisation du projet de fin d'études

### III.4. Intervenants Du Projet :

Les intervenants du projet sont indiqués dans l'organigramme ci- dessous :

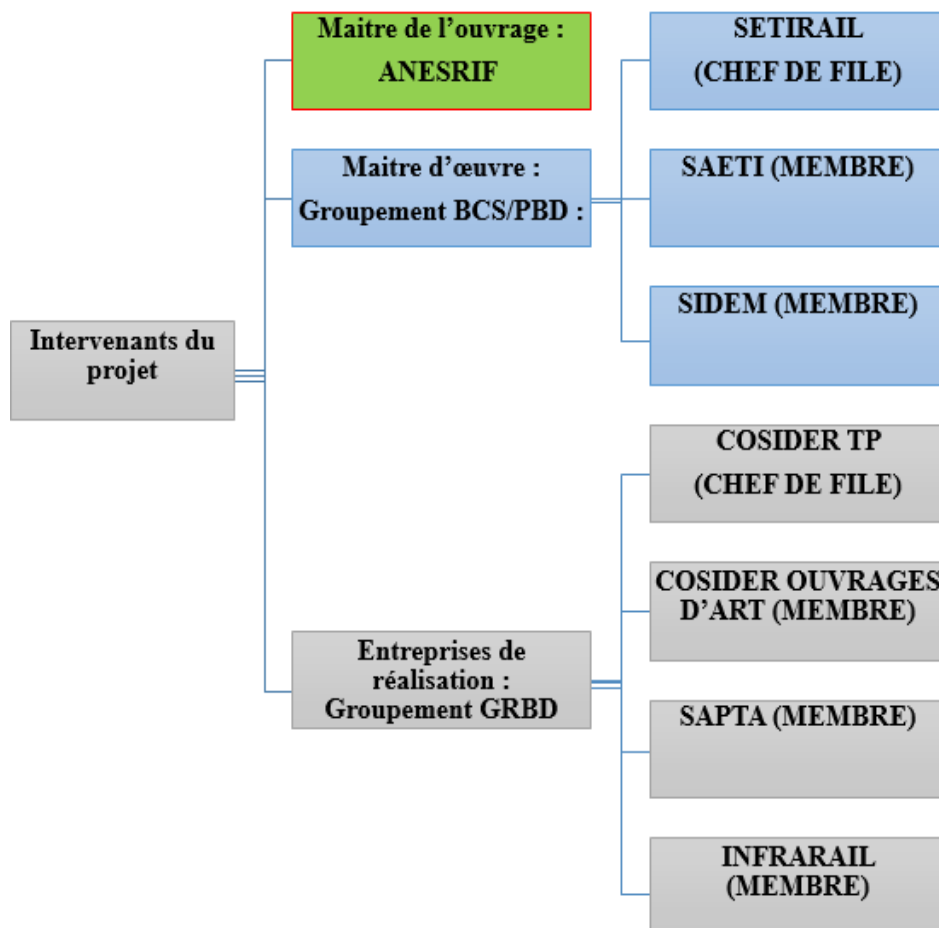


Figure III.2 : Les intervenants du projet

### III.5. Présentation de la wilaya de Djelfa :

#### III.5.1. La wilaya de DJELFA :

La wilaya de Djelfa est située dans les hauts-plateaux, à 300 km au Sud d'Alger, et ses limites sont :

- Au nord les wilayas de Tissemsilt et Médéa
- À l'est les wilayas de M'Sila et Biskra
- À l'ouest les wilayas de Laghouat et Tiaret
- Au Sud les wilayas de Ouargla et Ghardaïa

Elle a plus de **1.491.370** habitants sur une superficie de **32 256.35** km<sup>2</sup> représentant 1,36% de la superficie totale du pays se compose actuellement de 36 communes regroupées en 12 Dairas.



Figure III.3 : Les limites de Djelfa

#### III.5.2. Relief :

Le relief de la Wilaya de Djelfa est caractérisé par la succession de quatre (04) zones distinctes du Nord au Sud de son territoire. Le point culminant de la wilaya se trouve à l'Est de l'agglomération de Benyagoub dans la Daïra de Charef avec une altitude de 1.613 mètres et le point le plus bas est à l'extrême Sud de la wilaya avec une altitude de 150 mètres.

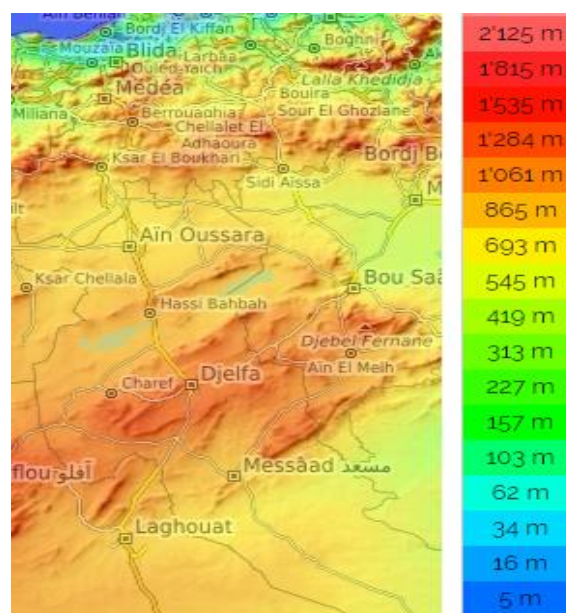


Figure III.4 : Carte topographique

**Zone plane du Nord :**

D'une superficie de l'ordre de 626.498. Elle est comprise entre 650 mètres et 850 mètres d'altitude. Cette plaine qui succède au piémont sud de l'Atlas Tellien et qui précède les dépressions des chotts (Zahrez chergui et Zahrez gharbi) est compartimentée en trois secteurs séparés par des collines érodées

**Zone des dépressions des chotts :**

Zone intermédiaire entre la zone plane du Nord et la zone de la dépression des Ouled Naïls, d'une superficie de l'ordre de 457.937 ha. Elle est comprise entre 750 mètres et 850 mètres d'altitude.

**Zone de la dépression des Ouled Naïls :**

D'une superficie de l'ordre de 356.815 ha. Cette zone est formée de petites plaines dont l'altitude varie entre 900 mètres et 1.600 mètres. La partie haute de la dépression est constituée de la chaîne montagneuse des Ouled Naïls dont l'altitude comprise entre 1200 m et 1600 m.

**Zone du plateau prédésertique :**

D'une superficie de l'ordre de 1.784.385 ha. Cette zone est aussi appelée « Plateau Saharien » et se situe dans la partie Sud de la Wilaya. Elle plonge dans la dépression formée par l'Oued Djedi considéré comme la limite naturelle du Sahara.

**III.5.3. Climatologie :**

Le climat de la Wilaya de Djelfa est nettement semi-aride à aride avec une nuance continentale. En effet, le climat est semi-aride dans les zones situées dans les parties du Centre et du Nord de la Wilaya avec une moyenne de 200 mm à 350 mm d'eau de pluie par an et aride dans toute la zone située dans la partie Sud de la Wilaya et qui reçoit moins de 200 mm d'eau de pluie en moyenne par an. Les vents dans cet endroit sont caractérisés par leur intensité et leur fréquence.

**III.6. Objectifs du projet :**

Le tracé doit répondre aux objectifs économiques et aux besoins de la région en respectant les normes nationales et internationales des chemins de fer, elle vise à :

- ❖ Un gain de temps de transport et une amélioration de la sécurité.
- ❖ Participer au développement économique de cette région.
- ❖ Un moyen de redéploiement des activités et de peuplement de la zone
- ❖ Une stratégie de développement des Hauts-Plateaux.
- ❖ La redynamisation du secteur BTPH lors des travaux,
- ❖ L'ouverture des régions les unes aux autres
- ❖ La préservation et la pérennité des ressources naturelles.
- ❖ La valorisation et l'optimisation de toutes les potentialités.

### III.7. Les données de notre projet

- Longueur du projet : **13 km** du **PK 142+000** au **PK 155+000**
- Nombre de voies : voie unique avec possibilité de duplication dans le futur
- Caractéristique de la voie : **ligne mixte** (voyageurs et marchandises)
- Vitesse max des trains de voyageurs : **220 km /h**
- Vitesse max des trains de marchandises : **100 km /h**
- Rayon minimal : **1842m**
- Type de rail : **UIC 60E1**
- Les traverses : mono bloc **M450**. (Vitesse 220km/h)
- Rampe verticale maximale : **16 ‰**
- Longueur maximale des trains marchandises : **800m**
- Charge à l'essieu de conception en pleine voie : **22.5t**
- Charges à l'essieu pour les ouvrages d'art : **25t**
- Ecartement de la voie : **1.435m**
- Traction diésel, avec possibilité dans le futur d'électrification.
- Largeur de la plateforme : **8m** (voie unique)
- Paramètres de tracé suivant les normes UIC.

### III.8. Conclusion :

Ce projet est très intéressant pour la région et pour le pays car il accélère le développement et l'amélioration des conditions d'investissement et du commerce, donc il améliore le fonctionnement du pays grâce à l'augmentation des échanges entre les différentes régions du pays surtout nord-sud.

# **Chapitre IV**

## **Superstructure de la voie**

### IV.1. Introduction :

La voie de chemin de fer est un assemblage d'éléments de nature différente dont les caractéristiques physiques et mécaniques ne sont pas les mêmes qui permettent la transition à la plate-forme (infrastructure), les charges statiques et dynamiques des roues, pour pouvoir supporter les efforts verticaux, transversaux, longitudinaux. La voie comporte deux rails dont l'inclinaison et l'écartement sont maintenus par des traverses qui sont elles-mêmes, disposées le long de la voie et reposées sur une couche de ballast.

### IV.2. Les caractéristiques de la voie

Les caractéristiques de la voie ferrée adoptées par **SNTF** sont :

- L'écartement des rails.
- La longueur des rails en voie.
- Le type de rail utilisé (poids, longueur, section).
- Le mode de fixation des rails aux traverses.
- Le type et la densité des traverses.
- Le support (ballast ou béton).
- La charge admise par mètre courant ou à l'essieu.
- La vitesse des trains.
- Le tracé en plan (rayons de courbure et dévers).
- Le profil en long (pente ou rampe).

### IV.3. Catégorie de la voie :

Il existe plusieurs catégories de voie, chacune d'elles a une vitesse maximale et une charge à l'essieu propre à elle on cite :

- ✓ **Les voies principales** : attribuées à la circulation de la voie
- ✓ **Les voies de service** : attribuées aux manœuvres.
- ✓ **Les voies de circulation** : attribuée aux grands complexes ferroviaires.
- ✓ **Les voies d'évitement** : permettent le croisement de deux terrains circulant à contre sens sur une voie unique.
- ✓ **Les voies de garage** : attribuées au stationnement des trains.

### IV.4. Les composantes de la voie :

La voie ferrée se compose de rails, mais aussi de traverses, d'attaches et du ballast. Ces éléments, qui remplissent chacun un rôle précis, constituent la superstructure de la voie ferrée.

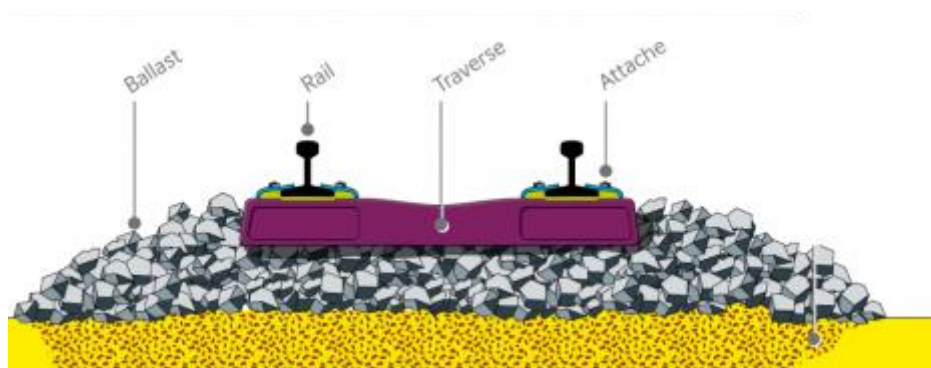


Figure IV.1 : Les composantes de la voie

### IV.4.1. Les rails :

#### IV.4.1.1. Définition :

Ce sont deux fils parallèles de barres d'acier profilées mis bout à bout pour former la voie ferrée, et sont en contact avec les roues des véhicules. Leur fonction est de guider le train et d'assurer la transmission des charges ponctuelles aux traverses.

#### IV.4.1.2. Le rôle du rail :

Le rail doit assurer les fonctions suivantes :

- ✓ Supporter la charge des roues et les efforts dynamiques qui en résultent.
- ✓ Forme une surface de roulement continue et plane qui permet de minimiser les efforts de traction.
- ✓ Assurer le guidage des véhicules en courbe, en reprenant les efforts transversaux dus à la force centrifuge.
- ✓ Reprendre les efforts longitudinaux provoqués par l'accélération, le freinage et la résistance au roulement des convois.
- ✓ Permettre le passage du courant électrique de retour et de fonctionnement des installations de sécurité. [2]

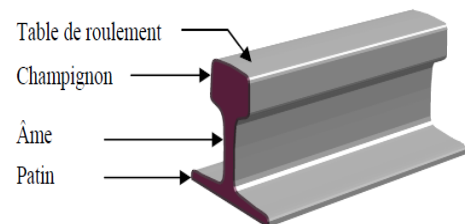
#### IV.4.1.3. Type des rails :

Selon leur géométrie, les rails se divisent en trois types dont on distingue :

- **Le rail Vignole :**

Ce type est généralement utilisé pour le cas des trains de transport de marchandise et de transport de voyageur à longue distance. Le profil est composé de :

**Champignon ; Ame ; patin.**



**Figure IV.2 : Le rail Vignole**

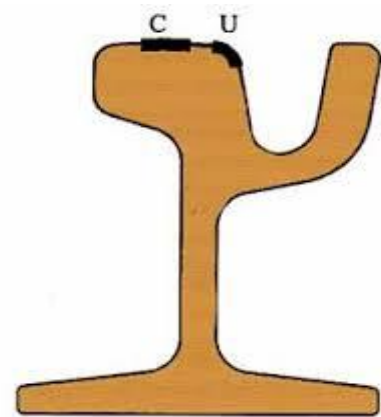
**Le patin :** qui s'appuie sur la traverse

**Le champignon :** qui constitue le chemin de roulement

**L'âme :** qui relie le champignon au patin pour supporter la charge.

- **Le rail a gorge :**

Ce type est utilisé pour les tramways. Il est constitué d'une gorge qui reçoit le boudin de la roue, car la voie est encastrée dans la chaussée routière.



**Figure IV.3 : Le rail a gorge**

- **Le rail à double champignon :**

Le rail à « double champignon symétrique » avait été conçu pour permettre de retourner le rail usé et donc doubler sa durée de vie. Le défaut de ce système était que lorsque le rail était retourné, il était déjà abîmé (poinçonnements dû à l'écrasement au niveau des berceaux). Ce principe a été abandonné.



Figure IV.4 : Le rail à double champignon

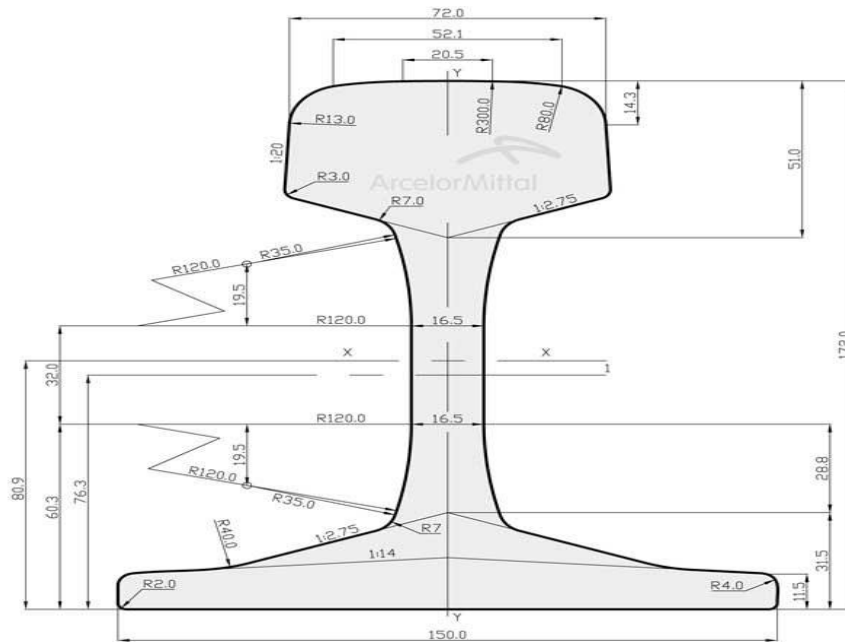
✓ **Cas de notre projet**

Dans notre projet on s'intéresse au rail à patin Vignole sera du type 60 E1 (60,21 kg/m). La fabrication et la fourniture des rails seront conformes à la norme : EN 13674-1 :2011 (Rails Vignole de masse  $\geq 46$  kg/m)

#### IV.4.1.4. Caractéristiques de rails du type UIC 60 E1 :

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques du rail UIC 60

Caractéristique	Valeur
Surface de la section	76.7 cm <sup>2</sup>
Masse par mètre	60.21 kg/ml
Hauteur du rail	172 mm
Largeur du champignon	72 mm
Largeur du patin	150 mm
Épaisseur âme	16.5 mm
Moment d'inertie, axe xx	3038.3 cm <sup>4</sup>
Moment d'inertie axe yy	512.3 cm <sup>4</sup>
Module d'inertie champignon	333,6 cm <sup>3</sup>
Module d'inertie patin	375,5 cm <sup>3</sup>
Module d'inertie (axe y-y)	68,3 cm <sup>3</sup>
Résistance à la traction	$R \geq 880$ N/mm <sup>2</sup>
Allongement	$R \geq 10\%$
Dureté au milieu de la table de roulement	260-300 HBW
Dimension indicative A	20.456 mm
Dimension indicative B	52.053 mm
Dressage	Classe A
Nuance	260 (carbone-manganèse)



**Figure IV.5: Section du rail Vignole 60E1**

#### IV.4.1.5. L'écartement des voies :

L'écartement le plus répandu dans le monde (60 % des chemins de fer) est de 1435 mm C'est celui que l'on qualifie de « normal ». Un écartement supérieur est appelé voie large et un écartement inférieur, voie étroite

#### IV.4.1.6. Assemblage des rails :

Il existe deux modes d'assemblages des rails, l'éclissage et la soudure :

- **L'éclissage :**

L'éclissage permet d'assembler deux rails consécutifs à l'aide de deux éclisses. L'éclissage doit satisfaire aux conditions suivantes :

- ✓ Relier les rails de façon qu'ils se comportent comme une poutre continue en alignement et en nivellement.
- ✓ Avoir une résistance à la déformation qui approche d'aussi près que possible celle des rails qu'il assemble
- ✓ Empêche les mouvements verticaux ou latéraux des extrémités des rails l'une par rapport à l'autre, tout en permettant la dilatation.
- ✓ Être aussi simple que possible et composé d'un minimum d'élément.[3]



**Figure IV.6: Assemblage des rails par éclissage**

- **Les longs rails soudés (LRS) :**

On appelle long rail soudé (L.R.S) une barre de la longueur est suffisante pour qu'un, au moins, de ses points reste fixe, quelles que soient les variations de température, il est en état de dilatation ou de contraction totalement ou partiellement contrariée, ce qui n'est pas possible que par suite du double frottement entre rail et traverse et entre traverse et ballast.

**Les avantages de LRS :**

- Suppression de l'éclissage boulonné.
- Une meilleure qualité de roulement et plus grand confort pour les voyageurs.
- Minimiser le coût d'entretien de la voie.
- Réduction de l'usure de la superstructure et des véhicules
- Réduction des défauts et avaries de rails

**Les inconvénients de LRS :**

- Efforts longitudinaux importants.
- Un risque de déformation par flambement de la voie
- Résistance latérale affaiblie.
- Défaut de la soudure et de construction

**Soudure des LRS :**

Le rail 60E1 sera fourni en barres élémentaires de 18 m que seront soudées **électriquement** sur chantier, en barre continue de longueur de 288 m. Ensuite, les barres de 288 m seront mises en place et soudées avec des soudures **aluminothermiques** en voie.

**Cas de notre projet :**

On a utilisé le système LRS



**Figure IV.7: Soudure des LRS**

**IV.4.2. Les traverses :****IV.4.2.1. Définition :**

Une traverse est un élément fondamental de la voie ferrée. C'est une pièce posée en travers de la voie, sous les rails, pour en maintenir l'écartement et l'inclinaison, et transmettre au ballast les charges des véhicules circulant sur les rails. Le nombre de traverses au kilomètre (travelage) est variable, généralement de 1666/1667 traverses/km à la **SNCF**

**IV.4.2.2. Le rôle des traverses :**

Les traverses jouent un triple rôle :

Transmission des charges au ballast.

Maintenir de l'écartement de deux files de rails.

Maintenir de l'inclinaison de 1/20 de rail Vignole. [3]

**IV.4.2.3. Les types des traverses :**

Il existe 3 types de traverses :

- **Les traverses en bois :**

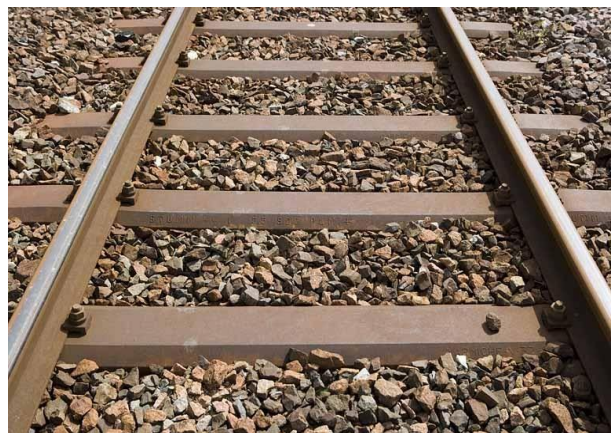
Elles sont généralement en chêne, en bois exotique dur. Elles isolent les courants électriques qui circulent dans les rails, leur souplesse favorise le confort et elles peuvent être rectifiées sur place, leur inconvénient est celui de la sensibilité aux attaques atmosphériques



**Figure IV.8: Les traverses en bois**

- **Les traverses métalliques :**

Elles sont un produit industriel de fabrication simple. Elles sont constituées d'un laminé en forme de U renversé, embouti à leurs extrémités, pour former des bêtes qui s'enfoncent dans le ballast et s'opposent au déplacement transversal de la voie. Elles sont légères (environ 80 Kg) et facile à poser.



**Figure IV.9: Les traverses métalliques**

**Les traverses en béton :** L'utilisation des traverses en béton est en nette augmentation, tant à cause de leur qualité intrinsèque que pour le prix élevé des traverses en bois. Les traverses en béton, par leur poids important, assurent un bon ancrage de la voie dans le ballast. Elles sont en particulier utilisées pour les lignes nouvelles à grande vitesse.

Il existe deux types de traverses en béton :

**Traverses en béton bi-bloc :** Ce type de traverses sont en béton armé, formée de 2 blochets chaque blochet a 2 gaines en plastiques pour la fixation du rail, elles sont reliées par une entretoise métallique, elles sont utilisées dans Les voies de service, les voies d'évitement et les voies tiroirs

**Traverses en béton monobloc :** Ce sont des traverses formées en un seul bloc de béton précontrainte, elles sont utilisées dans toutes les sections de voie courante



**Figure IV.10: Traverses monobloc et bi-bloc en béton**

#### **Cas de notre projet**

Le type des traverses utilisé sont les traverses monobloc en béton précontrainte de type **M450** (masse de 285-300 Kg)

#### **Les semelles :**

La semelle est une plaque élastique (en élastomère) d'une épaisseur de 9 mm qui est interposée entre la traverse et le rail. Elle assure, grâce à sa souplesse, la transmission et la répartition des charges rail/traverse sur les traverses voisines de la traverse chargée. Elle joue aussi un rôle d'absorbant des ondes vibratoires mécaniques et acoustiques [4].



**Figure IV.11: Semelle en élastomère**

### **IV.4.3. Les attaches :**

#### **IV.4.3.1. Définition :**

Les attaches rail-traverse assurent la fixation du rail sur la traverse et résistent aux mouvements verticaux, latéraux et longitudinaux du rail

**IV.4.3.2. Le rôle des attaches :**

- Assurer le serrage du rail sur la traverse
- Encaisser les efforts longitudinaux et dynamiques au passage des trains,
- Assurer le positionnement du rail sur la traverse

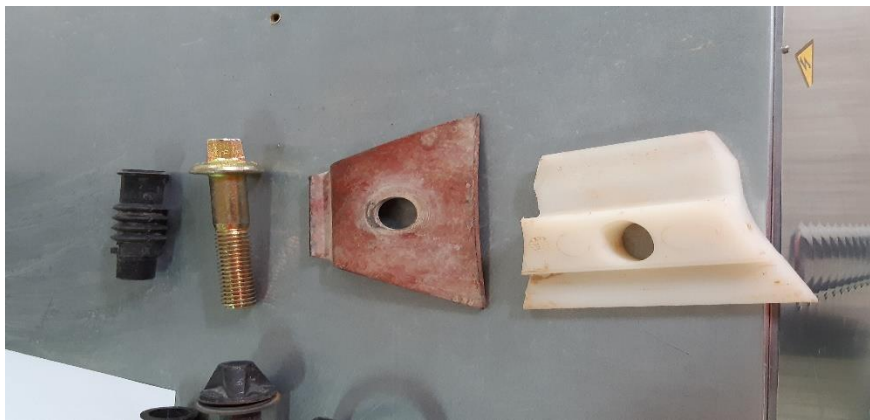
**IV.4.3.3. Les types d'attaches :**

Il existe plusieurs types et techniques d'attache, selon le type de traverses.

Dans ce projet, les attaches élastiques considérées pour rail 60E1 avec les traverses de béton monobloc M450NP, sont du type **Nabla**

**• L'attache de type NABLA :**

La plus utilisée actuellement est constituée par un crapaud (lame-ressort) maintenu par un écrou (tirefond) vissé sur une tige filetée dans des encoches accrochées dans le blochet.



**Figure IV.12: L'attache de type NABLA**

**IV.5. Les appareils de la voie :**

Les "appareils de voie" sont constitués de rails spéciaux (croisement de rails) et d'éléments mobiles (aiguille). Ils permettent le passage d'une voie à une ou plusieurs autres.

Les éléments constitutifs d'un appareil de voie de type branchement simple :

- 1 : partie aiguillage qui comprend les aiguilles mobiles et les contre-aiguilles
- 2 : partie intermédiaire qui est assimilable à de la voie courante
- 3 : partie croisement qui comprend le cœur de croisement et les contre-rails

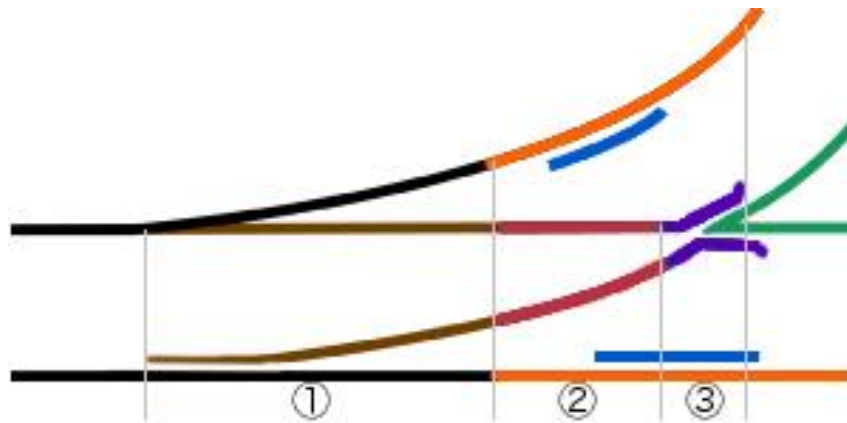


Figure IV.13: Les éléments constitutifs d'un appareil de voie

**Exemple d'appareil de voie :**

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

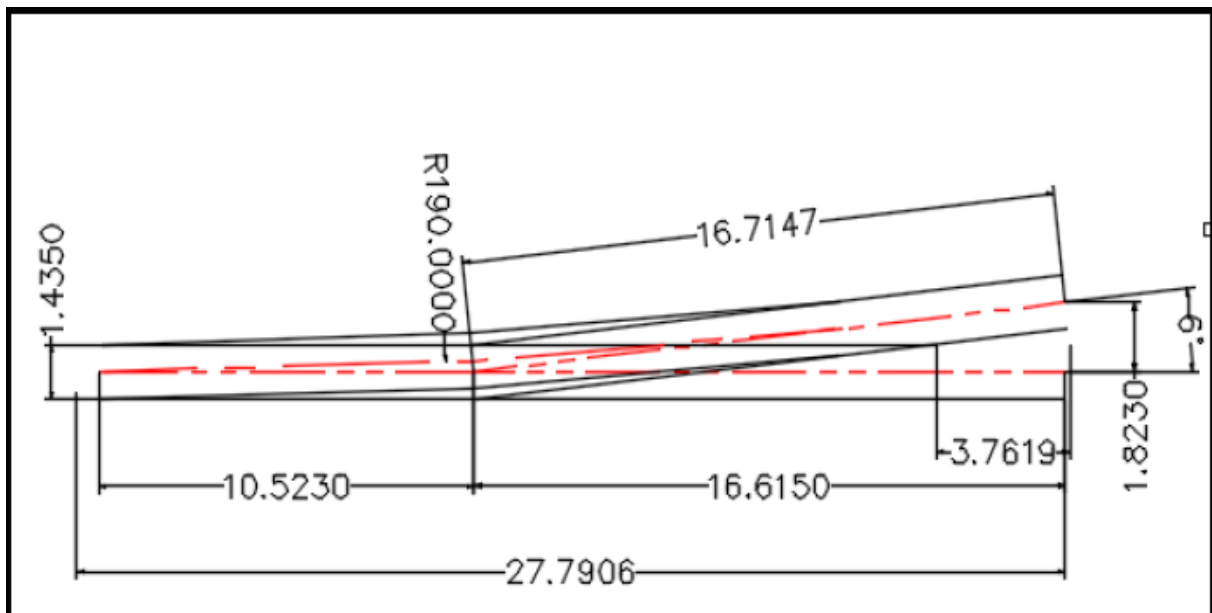


Figure IV.14 : Conception d'appareille de voie UIC 60 1/9-190

**IV.6. Conclusion :**

Ce présent chapitre recueille les caractéristiques, les catégories et les différents constituants de la voie, ainsi que les rails et leur assemblage, les travers, les systèmes d'attache et les appareils de voie.

# **Chapitre V**

## **Géométrie de la voie**

## V.1. Introduction :

L'étude géométrique du tracé en plan ayant pour but d'obtenir un roulement parfait et sécurisé des wagons, avec le choix du tracé le plus économique, et qui répond aux conditions et recommandations exigées par les normes internationales ferroviaires.

## V.2. Tracé en plan :

Le tracé en plan est la projection verticale de la voie sur un plan horizontal, il est caractérisé par la vitesse de référence qui permet de définir les caractéristiques géométriques nécessaires à tout aménagement. Le tracé en plan vise à garantir de bonne condition de sécurité et de confort adaptées à chaque catégorie des voies

Dans le cadre de notre projet les deux vitesses caractéristiques sont :

- V-max : vitesse des trains rapides (voyageurs) : 220 km/h.
- V-max : vitesse des trains (marchandises) : 100 km/h.

### V.2.1. Catégories de profil des lignes de chemin de fer :

Le profil des lignes de chemin de fer se classe en trois catégories :

- **profil de plaine** : le tracé suit le relief peu accentué des grands espaces. Les courbes sont rares et de grand rayon ( $> 1\ 000\ m$ ) autorisant des vitesses élevées. Les déclivités présentent de faibles valeurs (5 ‰).
- **profil accidenté** : le tracé suit les vallées sinueuses et franchit les accidents du relief (seuils, cols, défilés). Les rayons de courbes sont faibles ( $500 < R < 1\ 000\ m$ ). Les déclivités sont prononcées ( $5\ ‰ < i < 20\ ‰$ ).
- **profil exceptionnel de montagne** : tous les axes ferroviaires traversant les massifs montagneux appartiennent à cette catégorie. Courbes et déclivités atteignent des valeurs exceptionnelles (250 à 500 m de rayon, rampes de 25, 30, voire 90 ‰). Les contraintes du relief imposent fréquemment la construction d'ouvrages d'art imposants : ponts, viaducs, remblais, tranchées, tunnels.

### V.2.2. Catégories de trafic :

On distingue les catégories de trafic suivantes :

- **I-** lignes à trafic mixte, avec vitesses des trains de voyageurs supérieure à 80 km/h et au plus égale à 120 km/h.
- **II-** lignes à trafic mixte, avec vitesses des trains de voyageurs supérieures à 120 km/h et au plus égale à 200 km/h.
- **III-** lignes à trafic mixte, conçu pour une vitesse des trains de voyageurs peuvent atteindre 250 km/h. sont données utilisées sur les lignes nouvelles des FS et de DB. Les vitesses maximales sont provisoirement limitées à 200 km/h.
- **IV-** lignes à trafic mixte, avec vitesses des trains de voyageurs supérieures à 250 km/h et pouvant atteindre 300 km/h sont données les valeurs utilisées sur les lignes TGV.

### V.2.3. Les règles à respecter dans le tracé en plan :

Pour faire un bon tracé en plan dans les normes on doit respecter certaines recommandations :

- L'adaptation de tracé en plan au terrain naturel afin d'éviter les terrassements importants,
- Eviter de passer sur des terrains agricoles et des zones forestières,
- Eviter le franchissement des oueds afin d'éviter le maximum d'ouvrages d'arts et cela pour des raisons économiques, si le franchissement est obligatoire essayer d'éviter les ouvrages biais.
- Eviter Les sites qui sont sujets a des problèmes géologiques.

### V.2.4. Les conditions de raccordement

#### ✚ Condition de gauchissement :

On doit limiter, dans les zones de variation du dévers la pente relative au profil en long du rail déversé par rapport à l'axe de la voie.

#### ✚ Condition du confort dynamique :

C'est pour que la progression du dévers et de la courbure assure la stabilité et le confort dynamique.

### V.2.5. Les éléments du tracé en plan :

Un tracé ferroviaire en plan est constitué de tronçons en alignement et de tronçons de courbes circulaires, entre lesquels il faut généralement intercaler des courbes de raccordement.

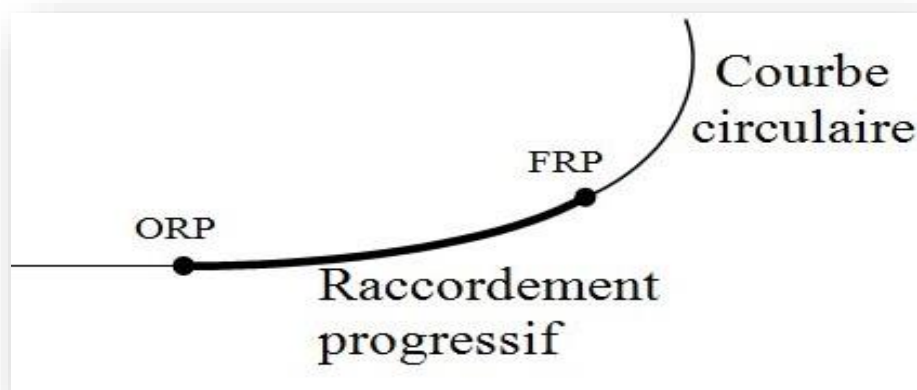


Figure V.1 : Les éléments du tracé en plan

**V.2.5.1. Raccordement courbe – alignement :**

Le passage d'un alignement à une courbe de rayon  $R$  en dévers  $d$  ne peut s'effectuer de manière discontinue : l'inconfort des passagers et la fatigue du matériel en seraient encore aggravés.

Afin de permettre l'entretien ultérieur de la ligne, les éléments de tracé « pleine courbe » et « courbe de transition » seront matérialisés par des repères d'entrevoie placés, tous les 10 mètres, à 1 mètre du bord extérieur du rail de chaque voie et les ORP (origine du raccordement progressif) et FRP (fin du raccordement progressif) seront repérées.

Un listing des courbes précisant leurs principales caractéristiques (ORP, FRP, rayons, dévers,  $\Delta d / \Delta l$ ,  $\Delta l / \Delta t$ ) ainsi que le diagramme des flèches et des dévers seront fournis en version papier et sous forme d'un logiciel adapté. La clothoïde sera utilisée comme courbe de transition.

Le plan de l'axe du tracé correspondra à l'axe de la voie dans le cas de voie unique, et à l'axe de la plate-forme dans le cas de voie double.

**a) L'alignement :** Un alignement droit est une courbe de rayon infini ( $R=\infty$ ) (de courbure nulle ( $\rho=0$ )) sur le plan technique c'est le meilleur tracé qui convient aux voies ferrées.

**Tableau V.1 : Les longueurs minimales des alignements et des pleines courbes.**

Valeur limite normale	$V/2 = 110$
Valeur limite exceptionnelle	$V/3 = 73.33$

**b) Les courbes de raccordement :**

Le passage d'un alignement à une courbe en dévers ne peut s'effectuer de façon instantanée, une variation progressive est nécessaire tant pour le confort des voyageurs et pour l'inscription des véhicules dont l'inertie est importante.

- Les rayons des courbes de raccordement ne doivent pas être inférieure à **2000 m [5]**.

**c) La courbe circulaire :**

Dans les zones où la topographie ne permet pas de réaliser les alignements, on fait recours aux raccordements circulaires avec le plus grand rayon possible qui est en fonction de la vitesse de circulation des trains dans la courbe. Une courbe circulaire est une courbe de rayon bien déterminé.

- La valeur du rayon minimum admissible est limitée pour assurer, en fonction des vitesses de circulation, le confort des voyageurs et éviter que les efforts transversaux sur la voie ne soient trop importants. Le rayon minimum (normal et exceptionnel), sera défini à partir de l'insuffisance de dévers admissible pour les vitesses maximales et à partir de l'excès de dévers pour les vitesses minimales sans que le dévers maximum ne soit dépassé.

Le rayon minimum de la courbe devra être déterminé comme suit :

- Pour la vitesse minimale de circulation des trains (trains lents), l'excès de dévers  $E$  devra être inférieur à la valeur maximum admissible.
- Pour la vitesse maximale de circulation des trains (trains rapides), l'insuffisance de dévers  $I$  devra être inférieure à la valeur maximale admissible.

Donc le rayon minimum doit se traduire par l'équation suivante [6] :

$$\frac{a}{g} \cdot \frac{V_{max}^2}{D_{max}+I} \leq R \leq \frac{a}{g} \cdot \frac{V_{min}^2}{D_{max}-E}$$

Ou bien :

$$R_{min} = \frac{11.8}{I+D} V_{max}^2$$

Tableau V.2 : Le rayon minimal en plan [5].

Valeur minimale normale (m)	1842
Valeur exceptionnelle (m)	1680

**V.2.6. Le raccordement progressif (RP) :**

C'est une courbe à rayon variable assurant la transition entre un alignement et une pleine courbe ou entre deux courbes circulaires de rayons différents. La clothoïde, ou son approximation la parabole cubique (dite de Nordling), présente une variation uniforme de la courbure et donc de la flèche. En général, du fait de la proportionnalité dévers / courbure, la variation de dévers est elle aussi uniforme. L'origine du raccordement progressif (ORP) est l'extrémité du RP côté alignement. La fin du raccordement progressif (FRP) est l'extrémité du RP côté pleine courbe. Dans le cas d'un RP entre deux courbes, l'ORP est l'extrémité du RP côté du plus grand rayon et la FRP, l'extrémité du RP du côté du plus petit rayon.

-ORP : Origine de raccordement progressif,

-FRP : Fin du raccordement progressif.

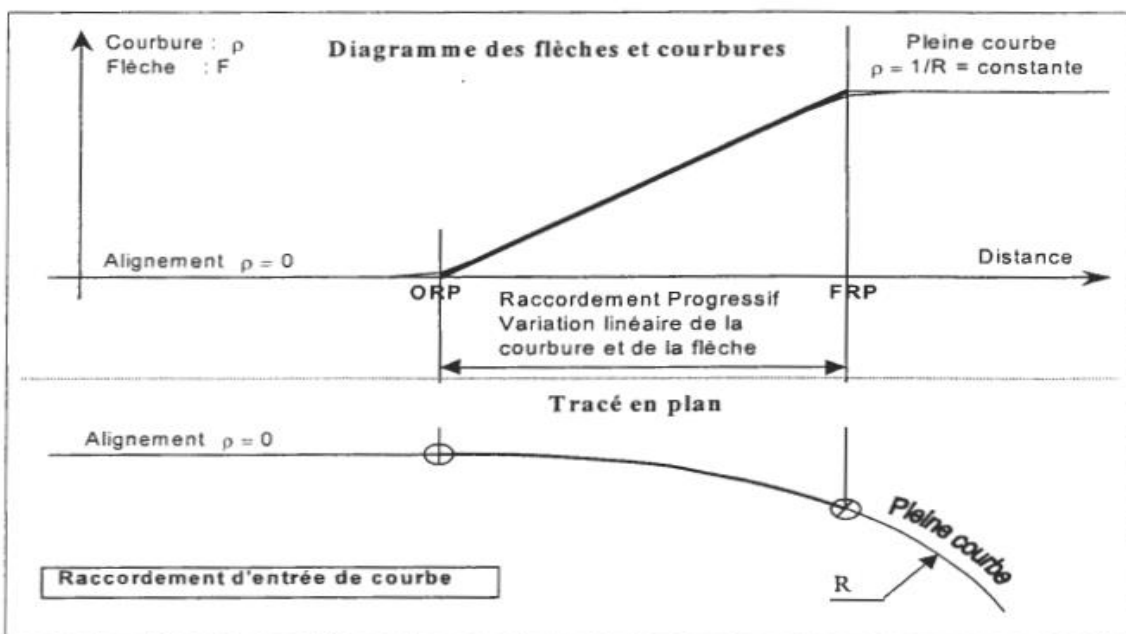


Figure V.2 : Diagrammes des flèches et courbures et tracer en plan d'un RP

**V.2.6.1 Raccordement Progressif d'inflexion :**

C'est un RP unique reliant une courbe à une contre-courbe avec une variation constante des flèches et des dévers entre les deux pleines courbes.

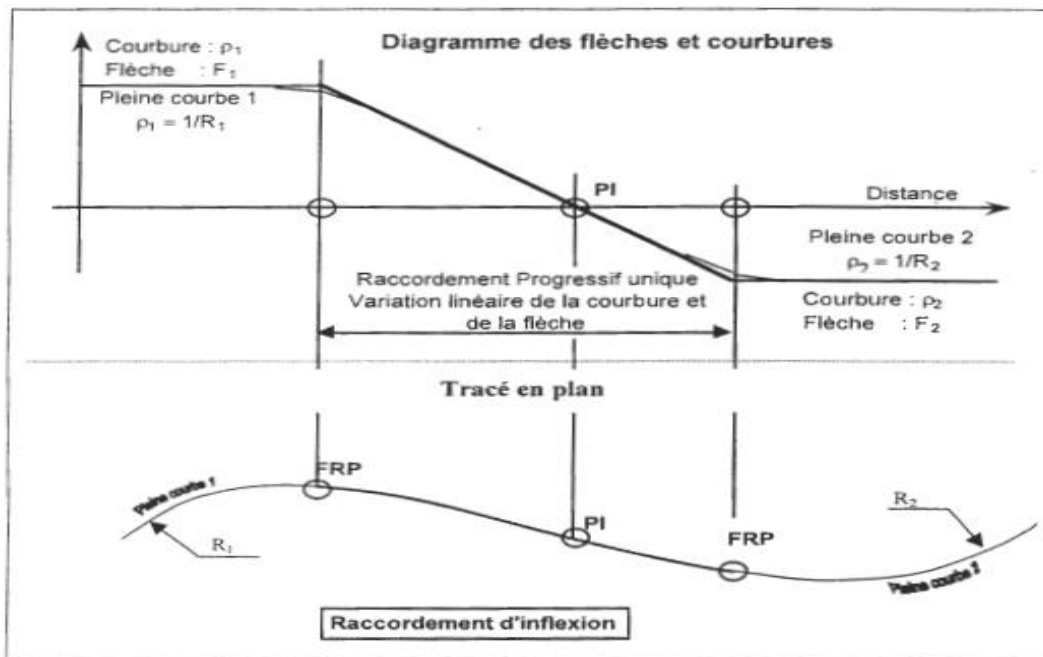


Figure V.3 : Diagrammes des flèches et courbures et tracer en plan d'un RP d'inflexion

**V.2.7. Géométrie des courbes de raccordement de la voie en plan :**

Les courbes de raccordement de la voie en plan doivent être conçues pour limiter la variation de l'accélération transversale non compensée ( $da_{nc}/dt$ ) afin de répondre à des exigences de confort (Fig5.6).

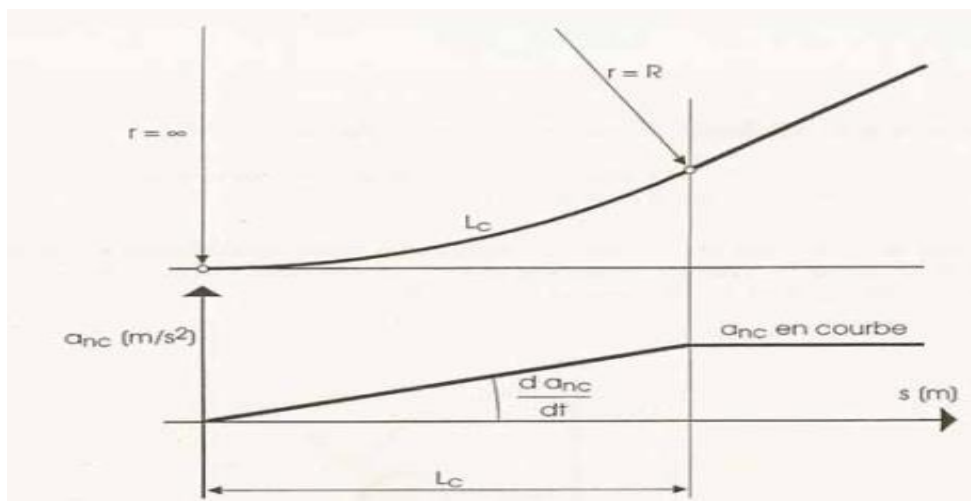


Figure V.4 : Courbe de raccordement et accélération non-compensée

## - Radioïde aux arcs : clothoïde ou spirale de Cornu (Fig.) :

$$\frac{1}{R_p} = K \times L_p$$
 : courbure proportionnelle à l'abscisse curviligne L mesurée

depuis le point d'inflexion 0.

$$\text{Avec } \frac{1}{K} = A^2$$

**A** : le paramétré de la clothoïde

$$\text{Et } L_p = \geq \frac{D_p \cdot V_{\max}}{3.6 \cdot \frac{\Delta d}{\Delta t}}$$

- Répondant le mieux aux conditions spécifiques du trafic, la clothoïde a totalement remplacé la parabole cubique pour les traces de chemins de fer. Son utilisation dans les projets routiers est également généralisée.

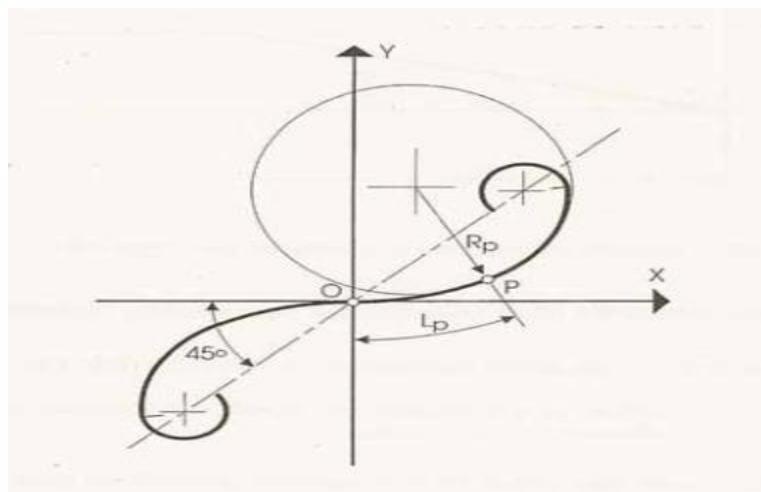


Figure V.5 : Illustration de clothoïde

### V.2.8. La section transversale :

**V.2.8.1. Le dévers théorique (le dévers d'équilibre) :** un véhicule ferroviaire de masse **M** circulant en courbe de rayon **R** à la vitesse **V**, est soumis à l'accélération due à la gravité à son poids **Mg** et à la force centrifuge :

$$F_c = M \times \frac{V^2}{R}$$

-Le dévers sera obtenu en surélevant le rail extérieur par rapport au rail intérieur. La variation du dévers à l'entrée et à la sortie d'une courbe sera continue tout au long de la courbe de transition.

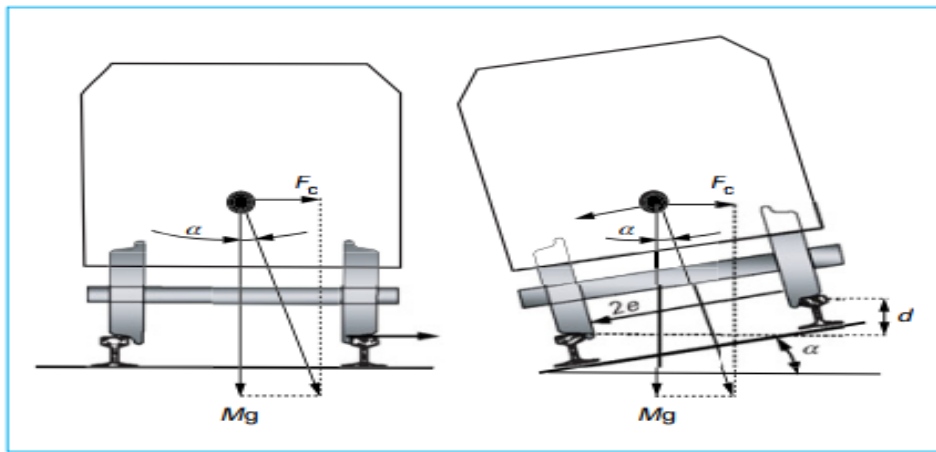


Figure V.6 : Force centrifuge et dévers.

-La valeur du dévers théorique  $D_{th}$  est : quand l'accélération latérale au niveau devient nulle, elle est dite parfaitement compensée par le dévers.

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

Avec :  $d_{th}$  en (mm) et  $V$  en (km/h) et  $R$  en (m).

#### V.2.8.2. Le dévers pratique (le dévers prescrit) et le coefficient de dévers :

Le choix du dévers à mettre en voie est un compromis, car il doit permettre la circulation, dans des conditions normales de sécurité et de confort, aussi bien des trains rapides de voyageurs que des trains lents de fret.

Ce dévers donné à la voie est appelé dévers prescrit (pratique).

Le choix d'un coefficient de proportionnalité  $C$  (appelé coefficient de dévers), constant sur une section de voie à trafic homogène donnée, entre le dévers prescrit  $d_p$  et la courbure ( $1/R$ ), permet de respecter simultanément les valeurs limites normales (ou, dans certains cas, exceptionnelles) des paramètres suivants :

- Dévers
- Insuffisance de dévers
- Excès de dévers
- Variation de dévers
- Variation d'insuffisance de dévers

-Le dévers pratique (prescrit) se calcule par la formule suivante :

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

$d_p$ : en mm

$R$  : en m

La valeur optimale du coefficient de dévers étant de l'ordre de :

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

$V$  : la vitesse du train le plus rapide exprimée en km/h

Toutefois, il pourra être ponctuellement adapté en raison de circonstances locales.

### V.2.8.3. Dévers maximaux en plein courbe :

Le dévers de la voie courante doit satisfaire aux deux conditions suivantes :

- 1ère condition :
  - Valeur limite normale : 160 mm
  - Valeur limite exceptionnelle : 180 mm

La valeur limite normale ne peut être dépassée que dans des cas très particuliers (pour maintenir la vitesse dans des courbes isolées difficiles à améliorer).

- 2nde condition :

La valeur limite du dévers en fonction du rayon  $R$  de la courbe et de la variation  $\frac{\Delta d}{\Delta l}$  de dévers dans les raccordements adjacents à la pleine courbe résulte du tableau ci-après :

**Tableau V.3 : Valeurs de dévers limite en fonction de la variation de dévers [5]**

Variation de dévers (mm/m)	Dévers limite
$\frac{\Delta d}{\Delta l} \leq 2$	$\frac{R - 100}{2}$
$2 < \frac{\Delta d}{\Delta l} \leq 3$	$\frac{R - 150}{2}$
$3 < \frac{\Delta d}{\Delta l} \leq 4$	$\frac{R - 250}{3}$

-Une courbe de dévers exceptionnel 180 mm ne peut se raccorder qu'à des éléments de tracé dont la variation de dévers est inférieure ou égale à 2 mm/m. Dans ce cas la présence d'une doucine de 30 m minimum est impérative. Ces valeurs ne peuvent être dépassées qu'exceptionnellement par dérogation notamment afin d'éviter des limitations localisées de vitesse. Ces dérogations peuvent être accordées, dans une certaine limite, sous réserve d'un graissage des rails suffisant. Elles peuvent également nécessiter la pose de contre-rail.

-L'utilisation d'un dévers supérieur à 160 mm est exclue en présence d'appareils de voie.

**Nota** : cette seconde condition ne s'applique pas aux courbes posées en contre dévers.

#### Remarque :

Quand, dans une courbe, un appareil de voie est enroulé intérieurement (CIN), la 2eme condition de limitation du dévers s'appliquera en prenant en compte, comme valeur  $R$ , non pas le rayon de cintrage (voie directe) mais le rayon résultant le plus défavorable de la voie déviée de cet appareil.

**Cas particuliers :**

Sur les voies situées le long des quais à voyageurs il est recommandé de limiter le dévers à 110 mm. Certaines autres configurations de voie telles que la présence de passages à niveau, de ponts ou tunnels et d'appareils de voie conduisent, dans certaines circonstances, à imposer des limitations de dévers plus restrictives.

**V.2.8.4. Insuffisance de dévers :**

Lorsque la vitesse d'un véhicule empruntant une courbe est plus élevée que la vitesse d'équilibre correspondant au dévers prescrit, ce véhicule est soumis à une force centrifuge non compensée. Le dévers de la voie est donc insuffisant et la résultante des forces se déplace vers l'extérieur de la courbe. On appelle insuffisance de dévers (exprimée en mm) la différence entre le dévers d'équilibre et le dévers prescrit.

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

L'insuffisance de dévers admissible dépend de l'armement de la voie et varie selon la catégorie des circulations. Les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous s'appliquent notamment à des voies ballastées constituées d'un armement moderne (rails 50 ou 60 kg avec 1666 traverses au kilomètre). Les valeurs acceptables avec des armements plus faibles sont précisées dans le référentiel IN 2542 (CG EF 1 C 2 n01).

**Tableau V.4 : Valeurs limites d'insuffisance de dévers en fonction de la catégorie de circulations**

Catégorie de circulations	Valeur limite normale	Valeur limite exceptionnelle
Catégorie I	110	130
Catégorie II	150	160
Catégorie III	160	180

-Ces valeurs ne s'appliquent pas aux circulations équipées de système de compensation d'insuffisance de dévers. Le cumul de valeurs de dévers et d'insuffisance de dévers exceptionnelles ne peut être autorisé qu'à titre dérogatoire. Ainsi, sauf dérogation, pour les circulations de catégories. I. II ou III, la somme du dévers et de l'insuffisance de dévers ne doit pas dépasser 330 ou 340 mm respectivement. Dans les situations où un armement moderne est retenu, les rayons minimaux admissibles sont obtenus en privilégiant une valeur élevée d'insuffisance de dévers.

Sur les lignes de raccordement déclarées interopérables au titre de la Directive 96/48/CE, les valeurs plus restrictives du tableau ci-dessous sont à adopter

**Tableau V.5 : Valeurs limites d’insuffisance de dévers en fonction de la vitesse maximale du train**

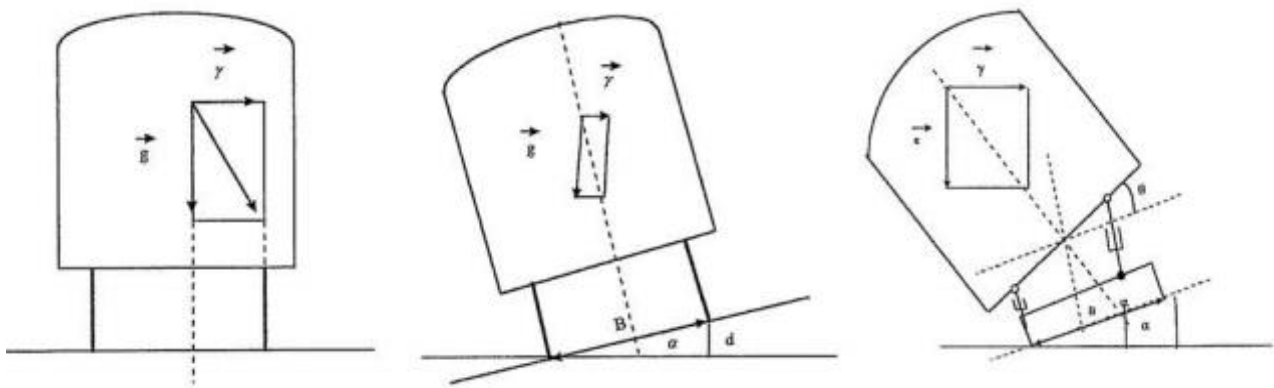
Vitesse maximale	Valeur limite normale	Valeur limite exceptionnelle
160<V≤200	150	165
200<V≤220	140	165

**V.2.8.5. Excès de dévers :**

Lorsque la vitesse d'un véhicule en courbe est plus faible que la vitesse d'équilibre correspondant au dévers prescrit, ce véhicule est soumis à une force centripète non compensée. Le dévers de la voie est donc excessif et la résultante des forces se déplace vers l'intérieure de la courbe. On appelle excès de dévers (en mm) la différence entre le dévers prescrit (pratique) et le dévers d'équilibre (théorique).

Il est calculé avec la formule suivante :

$$E = d_p - d_{th} = d_p - \frac{11.8 \times V^2}{R}$$



**Figure V.7 : Excès de dévers**

-Les valeurs maximales admissibles sont les suivantes :

**Tableau V.6 : Valeurs maximales de l’excès de dévers**

Valeur limite normale (m)	110 mm
Valeur limite exceptionnelle (m)	130 mm

Si les trains les plus rapides circulent avec une insuffisance de dévers, les trains lents sont alors souvent en excès de dévers. L'excès de dévers augmente les efforts exercés sur le rail intérieur par les trains lents, plus spécialement les trains de marchandises qui ont habituellement des masses par essieu plus élevées

Les valeurs limites sont les suivantes :

**a) Trains de fret :**

- Valeur limite normale : 110 mm
- Valeur limite exceptionnelle : 130 mm

**b) Trains de voyageurs :**

Pour la vitesse minimale normale du train le plus lent, il est souhaitable que l'excès de dévers ne dépasse pas 110 mm.

**V.2.9. Interaction entre trace en plan et section transversale :**

**V.2.9.1. La variation de dévers dans les courbes de transition  $\frac{\Delta d}{\Delta l}$  [mm/m] :**

La limite de la variation de dévers dans les courbes de transition est nécessaire pour que la vitesse de rotation des véhicules ne nuise pas à leur stabilité, cette variation doit vérifier les deux conditions suivantes :

- **1<sup>ère</sup> Condition :** Fonction de la vitesse V du mouvement le plus rapide.

**Tableau V.7 : Taux de variation du dévers  $\Delta d/\Delta l$**

Valeur limite normale (m)	$\frac{180}{V} = 0.82$
Valeur limite exceptionnelle (m)	$\frac{216}{V} = 0.98$

V : Vitesse du mouvement le plus rapide en [Km/h].

Dans notre projet égale à 220 Km/h.

- **2<sup>ème</sup> condition :** en fonction des valeurs du dévers et du rayon de la pleine courbe adjacente aux raccordements considérés :

**Tableau V.8 : Valeurs limites de la variation de dévers**

Valeur du dévers en pleine courbe ( $d_p$ en mm et R en m)	Valeur limite de la variation de dévers (en mm/m)
$\frac{R-100}{2} \geq d_p > \frac{R-150}{2}$	2
$\frac{R-150}{2} \geq d_p > \frac{R-250}{3}$	3
$\frac{R-250}{2} \geq d_p$	4

Il est recommandé d'éviter de recourir des variations de dévers supérieures à 2.5 mm/m. et elles ne doivent pas dépasser 4 mm/m.

**V.2.9.2. La variation de dévers en fonction du temps  $\frac{\Delta d}{\Delta t}$  :**

Dans les courbes de transition par unité de temps exprimé en [mm/s].

**Tableau V.9 : Valeurs limites de la variation de dévers**

Valeur limite normale mm/s	50
Valeur limite exceptionnelle mm/s	60

**V.2.9.3. La variation de l'insuffisance de dévers  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  :**

C'est le taux exprimé en mm/m suivant lequel l'insuffisance de dévers appliquée à une circulation circulant à une vitesse donnée augmente ou diminue par unité de temps.

Les valeurs maximales sont indiquées ci-dessous :

**Tableau V.10 : Valeurs limites de la variation de l'insuffisance de dévers**

Valeur limite normale	75 mm/s
Valeur limite exceptionnelle	90 mm/s

**V.2.10. Application au projet :****Calcul de rayon minimum en plan :**

$$R_{\min} \geq \frac{11.8 \cdot V_{\max}^2}{(D_{\max} + I)}$$

$$R_{\min} \geq \frac{11.8 \cdot 220^2}{(160 + 150)} = 1842.32$$

On prend : R = 2500 m.

**Calcul de dévers théorique D<sub>th</sub> :**

$$D_{th} = \frac{11.8}{R} V_{\max}^2 = \frac{11.8}{2500} 220^2 = 228 \text{ mm}$$

**Calcul de dévers pratique D<sub>p</sub> :**

$$D_p = \frac{1000 \times C}{R} = \frac{1000 \times 290.4}{2500} = 116 \text{ mm} \leq 160 \text{ vérifié.}$$

Avec :  $C = 0,006 \times V^2 = 0.006 \times 220^2 = 290.4 \text{ mm}$

**Insuffisance de dévers :**

$$I = D_{th} - D_p = \frac{11.8 \times V^2}{R} - D_p = 228 - 116 = 112 \text{ mm} \leq 150 \text{ vérifié.}$$

**Excès de dévers :**

$$E = D_p - D_{th} = D_p - \frac{11.8 \times V^2}{R} = 116 - \frac{11.8 \times 100^2}{2500} = 116 - 47.2 = 68.8 \text{ mm} \leq 110 \text{ vérifié.}$$

**Calcul de la longueur et le paramètre de la clothoïde :**

$$L_{cl} \geq \frac{D_p \cdot V_{max}}{3.6 \cdot \frac{\Delta d}{\Delta t}} = \frac{116 \cdot 220}{3.6 \cdot 50} = 141.77 \quad \text{on prend } L_{cl} = 150 \text{ m}$$

$$A = \sqrt{R \cdot L_{cl}} = \sqrt{2500 \cdot 150} = 612.37 \text{ m}$$

**Calcul de la variation de dévers dans les courbes de transition  $\frac{\Delta d}{\Delta l}$  :**

$$\frac{\Delta d}{\Delta L} = \frac{116}{150} = 0.77 \leq 0.82 \text{ vérifié.}$$

**Calcul de la variation de dévers  $\frac{\Delta d}{\Delta t}$  :**

$$\frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{D_p \cdot V_{max}}{3.6 \cdot L_{cl}} = \frac{116 \cdot 220}{3.6 \cdot 150} = 47.25 \leq 50 \text{ vérifié.}$$

**Calcul de la variation de l'insuffisance de dévers  $\frac{\Delta I}{\Delta T}$  :**

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I \cdot V_{max}}{3.6 \cdot L_{cl}} = \frac{112 \cdot 220}{3.6 \cdot 150} = 45.62 \leq 75 \text{ vérifié.}$$

**Tableau V.11 : Les paramètres significatifs de l'axe en plan**

R	D <sub>th</sub>	D <sub>p</sub>	I	E	L	A	$\frac{\Delta d}{\Delta t}$	$\frac{\Delta I}{\Delta t}$	$\frac{\Delta d}{\Delta L}$
2500	228	116	112	68.8	150	612.37	47.25	45.62	0.77
5000	114	58	56	34.6	80	632.45	44.30	42.77	0.72

**V.2.11. Les contraintes le long du tracé :**

- Lignes d'électricités de moyen tension (MT) au PK 145+252 et au PK 148+805 et de haute tension au PK 147+0990
- Conduite de GAZ au PK 144+673.873 et au PK 146+113.679
- **Les points fixes du tracé**

Pk	Type	Caractéristiques
144+400	PI	Passage inférieure (passage à faune)
149+012	PS	Passage supérieure (rétablissement de piste)
152+127	PI	Rétablissement de Piste avec Passage à faune

- Pistes à supprimer

PK	PK	PK	PK
144+114 1	148+851	151+126 1	153+782
144+595	149+230	151+954	154+104 1
144+670 1	149+498 1	152+912	154+138
147+271	150+358	153+130	154+451
148+335	151+096	153+467	154+911

### V.3. Le profil en long :

Le profil en long est une représentation plane de la surface du terrain naturel suivant un plan vertical contenant l'axe du tracé ; il détermine la configuration du terrain au droit de l'axe de la voie caractériser par des droites (pente, rampe), courbe horizontal ou incliné.

Le profil en long est l'un des facteurs principaux qui interviennent dans l'économie de déclivité maximale et autres caractéristiques techniques, il conditionne le degré ainsi que le volume de terrassement aussi bien que le cout de réalisation de la construction.

#### V.3.1. Les règles à respecter dans le tracé du profil en long :

- Recherche un équilibre entre le volume des remblais et les volumes des déblais.
- Assurer une bonne coordination entre le tracé en plan et le profil en long.
- Respecter les valeurs des paramètres géométriques préconisés par les règlements en vigueur (SNCF IN 0272) (EF 2 C 32).
- Un profil en long en léger remblai est préférable à un profil en long en léger déblai, qui complique l'évacuation des eaux.
- Éviter une hauteur excessive en remblai.
- Une pente nul dans la gare (une section plane).

#### V.3.2. Détermination des éléments caractéristiques du profil en long :

##### V.3.2.1. Déclivité maximale :

La valeur de la déclivité en un point donné. Elle correspond à :

$$i = 1000 \times \tan(\alpha)$$

Avec  $\alpha$  l'angle (dans un plan vertical) entre la voie en ce point et l'horizontale, et  $i$ , la déclivité instantanée exprimée en ‰. Pour le tracé, la déclivité est considérée positive en rampe et négative en pente.

La déclivité admise varie en fonction de sa longueur.

En principe, les valeurs admissibles à ne pas dépasser sont indiquées ci-après, cependant dans le cadre d'une étude de variante, ces valeurs pourront être dépassées tout en respectant les dispositions reprises dans la dernière version de l'instruction SNCF/RFF IN 0272 :

- En déclivité de longueur inférieure à 3000 m, elle ne doit pas dépasser 16‰ et exceptionnellement 18‰.
- En déclivité de longueur comprise entre 3 000 m et 15 000 m, elle diminue graduellement pour passer de 16‰ à 13‰, exceptionnellement de 18‰ à 15‰.

- En déclivité de longueur supérieure à 15 000 m, la déclivité ne doit pas dépasser 13‰ et exceptionnellement 15‰.

### V.3.2.2. Types des raccords de déclivités :

Dans la pose des voies neuves ou renouvelées on doit s'attacher à réaliser des raccordements de déclivités aux points de changement de pente lorsque la différence algébrique des déclivités est supérieure à 2 ‰ (cette valeur peut être portée à 4 ‰ lorsque la vitesse est inférieure ou égale à 60 km/h).

Sur voies principales, pour ne pas compromettre le confort des voyageurs, le rayon minimal de raccordement est fixé en fonction de la vitesse limite  $V$  de la ligne :

- Valeur limite normale :  $R=0,35 \times V^2$
- Valeur limite exceptionnelle :  $R=0,25 \times V^2$

Avec  $R$  = Rayon de la courbe de raccord (en m)

$V$  = Vitesse du train le plus rapide (en km/h)

AN :  $R_{v \min} = 0.35 \times V^2 = 16940 = 17000 \text{ m}$

Le rayon ne devra pas, sauf dérogation, être inférieur à 900 m. L'application de ces formules permet de limiter l'accélération verticale subie par les voyageurs à respectivement 0,22 et 0,31 m/s. Les changements de déclivité aux abords des appareils de voie sont précisés dans l'IN 0230.

### V.3.2.3. Longueur minimale des éléments de profil en long :

#### -Déclivité constante :

Afin d'éviter les oscillations des véhicules dues aux variations successives des déclivités, une longueur minimale de déclivité constante est à prévoir. Cette longueur, exprimée en m, est fixée à :

- Valeur limite normale :  $V/2$
- Valeur limite exceptionnelle :  $V/2.5$

$V$  étant la vitesse du train le plus rapide exprimée en km/h.

A.N :  $L_{\min} = V/2 = 110 \text{ m}$ .

Leur longueur doit, en principe, être d'au moins 30 m pour tenir compte des bases de nivellement des bourreuses.

### V.3.2.4. Positionnement des points de changement de déclivité :

Pour faciliter la maintenance, il est recommandé de positionner les points de changement de déclivité dans des éléments de tracé constants (alignement ou pleine courbe) à au moins 30 m d'une extrémité de doucine. La superposition d'éléments de raccordement de tracé en plan et en profil (RP + RC) ne peut s'envisager que dans le strict respect des caractéristiques normales de ceux-ci.

### V.3.3. Coordination profil en long et tracé en plan :

-Il est très nécessaire de veiller à la bonne coordination du tracé en plan et du profil en long en tenant compte également de l'implantation des points d'échange.

-Eviter les coïncidences entre les rayons du profil en long et les rayons du tracé en plan (Positionner les points de changement de déclivité dans des éléments de tracé constants (alignements ou pleine courbe)).



**V.4.2. Les éléments de profil en travers :**

- **La Plateforme :** La plateforme est le terrain aménagé sur lequel repose la voie, répondant à deux critères principaux :
  - la nature géotechnique du sol : granularité, dureté, altérabilité et contenu organique.
  - les conditions hydrologiques et hydrogéologiques.La plate-forme nécessite, dans la plupart des cas, des aménagements tels que remblais et déblais. Dans sa configuration définitive, avant pose de la voie, elle comprend différentes couches.
- **L'Emprise :** C'est la surface du terrain naturel affectée à la voie et à ses dépendances (talus, Chemins de désenclavement, etc....) limitée par le domaine public.
- **L'Assiette :** C'est la surface de la route délimitée par les terrassements.
- **La voie :** C'est la partie de la voie ferrée affectée à la circulation des trains.
- **La berme :** Supporte des équipements (barrières de sécurité, signalisations.), sa largeur dépend de l'espace nécessaire au fonctionnement du type de barrière de sécurité à mettre en place.
- **Le fossé :** C'est un ouvrage hydraulique destiné à recevoir les eaux de ruissellement provenant de la route et des talus et les eaux de pluie.

**V.4.3. Les profils en travers affectés au projet :**

Pour notre projet on caractérise nos profils en travers comme se suit :

- Type de ligne : voie unique mixte électrifiée.
- Ecartement de la voie : 1.435 m (standard).
- Largeurs de la plate-forme : 8 m.
- Pente latérale de la plate-forme : 4%.
- Pente latérale de la couche du ballast : 3H/2V.
- Épaisseur du ballast : 30cm.
- Épaisseur du sous-ballast : 25 cm.
- Épaisseur de couche de forme : 0.5 cm
- Pente (déblai : 1V/1.5H et remblai : 1V/2H).
- Fossé trapézoïdal ( $b= 0.50$  m ;  $h= 0.60$  m avec une berme de 3/2).

**Chapitre VI**  
**Etude Géologique et**  
**Géotechnique**

## VI.1. Introduction

L'étude géotechnique est une opération dont dépend en grande partie la qualité de l'ouvrage projeté. Sa démarche générale consiste d'abord à caractériser le sol afin de pouvoir proposer des solutions pratiques à la réalisation de l'ouvrage.

Son but est de fournir aux différents intervenants d'un projet tels que les ingénieurs, les architectes, les entrepreneurs, etc., des renseignements sur la nature et les propriétés des sols et de formuler des recommandations d'ordre géotechnique devant leur permettre de concevoir et de réaliser l'ouvrage projeté.

## VI.2. Etude géologique :

### VI.2.1 Cadre géologique général :

La zone où se développe le tracé en étude est localisée, géologiquement, autour du Domaine Atlasique (modulé au cours du Tertiaire par les mouvements alpins), entourée au Nord par le Complexe des Nappes Telliennes et l'Atlas Plissé (de l'Atlas Tellien) et au Sud par l'Atlas Saharien.

Le tracé de la voie ferrée entre Boughzoul et Djelfa, qui totalise un linéaire approximatif de 140km, parcourant du Nord au Sud les Hauts Plateaux et les contreforts septentrionaux de l'Atlas Saharien, se termine près du massif de Djebel Senalba.

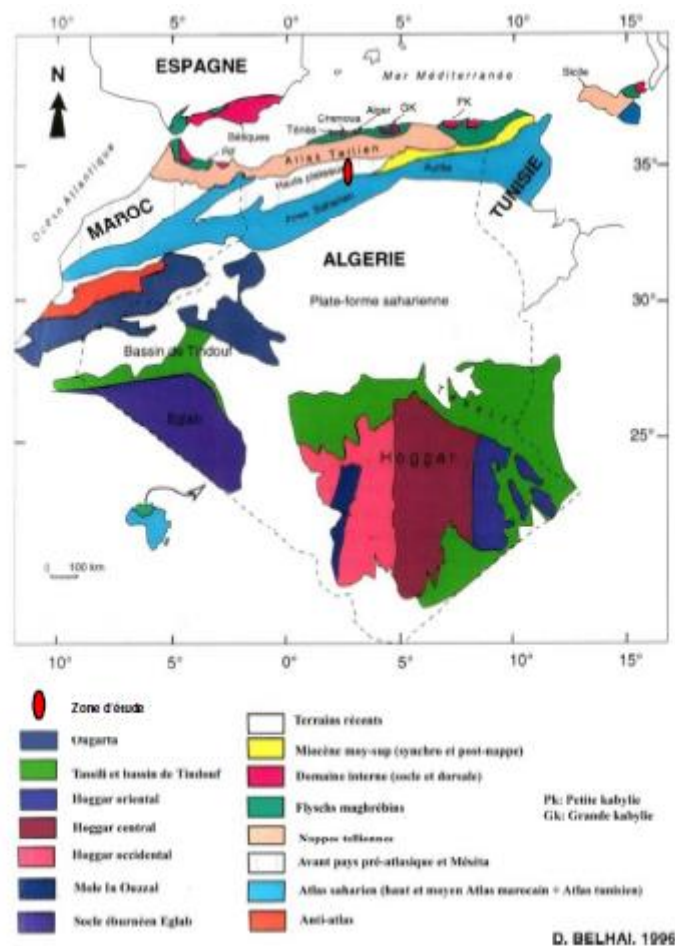


Figure VI.1 : Les grands ensembles géologiques de l'Algérie.

### VI.2.2. Géologie locale de la zone d'étude :

Du point de vue litho-stratigraphique, conformément à la feuille Alger Nord de la Carte Géologique de l'Algérie à l'échelle 1/500.000 et à la feuille numéro 163 (Boughzoul) de la Carte Géologique de l'Algérie à l'échelle 1/50.000, nous vérifions que le tracé de la future ligne ferroviaire se développe en terrains formés par des lithologies exclusivement sédimentaires, consolidées et pas consolidées, de nature sablonneuse, argileuse, argilo-carbonatée ou carbonatée.

Les âges des terrains traversés vont du Quaternaire, formés par des dépôts alluvionnaires, des dépôts de terrasses, dunes et croûte de précipitation, passant par le Tertiaire, formé par des complexes de sols et de roches douces, argileuses, sablonneuses et calcaires, et atteignant aussi les terrains plus anciens dans cette région de l'Age Mésozoïque formés surtout par des marnes, calcaires et grès.

#### -Alluvions actuelles (Qal)

Les dépôts des alluvions actuelles, forment des zones d'extension et épaisseur généralement réduite, ils sont composés majoritairement par des boues, argiles et limons avec des indices de sables et de gravillon. Dans les zones d'influence des massifs carbonatés et des roches sablonneuses, ils sont composés de sables et de boues, avec des couches de galets et de blocs, de nature siliceuse et/ou carbonatée

#### -Complexe Pliocène (Pi)

Le complexe Pliocène est constitué par une alternance irrégulière de tufs calcaires, avec des fragments de roches calcaires, argiles limoneuses brunes, fermes, à passages sablonneux et à précipitations carbonatées blanchâtres qui forment de l'encroûtement calcaire, de 50cm d'épaisseur moyenne.

- La description du contexte géologique traversé par la voie ferrée au notre zone d'étude donnée ci-dessous, par PK (point kilométrique) et indiquée dans le tableau

**Tableau VI.1 : Résumé des unités géologiques de la zone d'étude [7].**

Localisation (Pk de projet)	Extension (m)	Unité Géologique	Désignation / description
142+000 – 144+010	2010	Pi	Complexe Pliocène
144+010 – 144+105	95	Qal	Alluvions actuelles
144+105 – 153+300	9195	Pi	Complexe Pliocène
153+300 – 153+450	150	Qal	Alluvions actuelles
153+450 – 155+000	1550	Pi	Complexe Pliocène

### VI.2.3. Sismicité de la zone :

La carte sismique de l'Algérie montre la distribution des différentes zones sismiques en fonction de l'intensité des tremblements de terre enregistrés. Pour la zone d'étude, le risque des tremblements de terre est faible (zone I), avec des accélérations sismiques basiques comprises entre une valeur minimale de  $0,10 \text{ m/s}^2$  et maximale de  $0,15 \text{ m/s}^2$ .

Tableau VI.2 : Coefficient d'accélération de zone A (RPOA 2008) [8].

GROUP DE PONTE	ZONE SISMIQUE			
	I	IIA	IIB	III
1	$0.15 \text{ m/s}^2$	$0.25 \text{ m/s}^2$	$0.30 \text{ m/s}^2$	$0.40 \text{ m/s}^2$
2	$0.12 \text{ m/s}^2$	$0.20 \text{ m/s}^2$	$0.25 \text{ m/s}^2$	$0.30 \text{ m/s}^2$
3	$0.10 \text{ m/s}^2$	$0.15 \text{ m/s}^2$	$0.20 \text{ m/s}^2$	$0.25 \text{ m/s}^2$

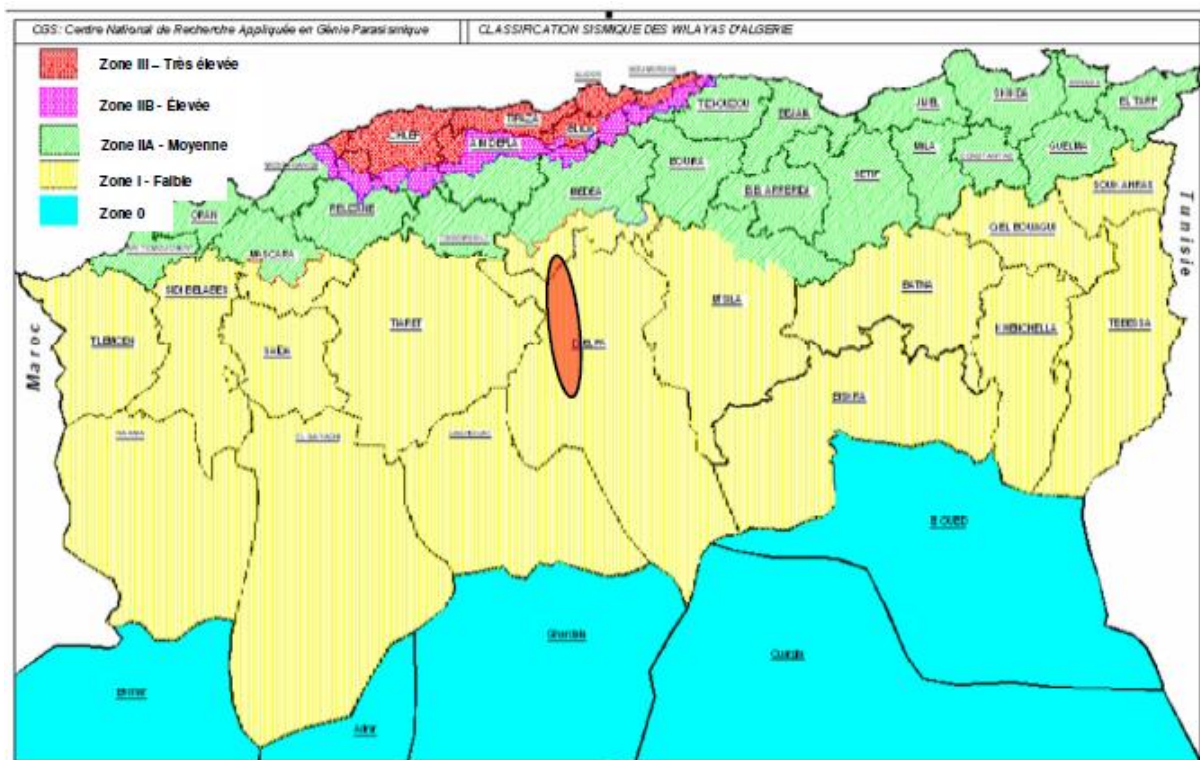


Figure VI.2 : Localisation de la zone d'étude dans la carte sismique de l'Algérie [8].

#### VI.2.4. Risques géologiques

- **Inondations et flux de boues**

Dû au caractère sporadique et torrentiel des pluies, les oueds sont susceptibles d'être affectés par des inondations, débordements et formation de flux de boues procédant des reliefs qui contournent les vallées.



**Figure VI. 3 : Action destructive de flux d'inondation sur le remblai de l'ancienne ligne ferroviaire.**

- **Éboulements, glissements de versants et chute de blocs**

En ce qui concerne la stabilité naturelle des matériaux, il faut remarquer les glissements et la chute de blocs, plus cimentés ressortent par rapport aux moins cimentés, pouvant arriver à tomber par gravité



**Figure VI. 4 : Chute de blocs de grès proche au PK 177+050**

### VI.3. Etude géotechnique

Au niveau du tronçon de notre projet, allant du PK 142+000 au PK 155+000, les différents travaux réalisés dans la campagne géotechnique sont :

- Puits de reconnaissance
- Sondages mécaniques
- Les essais de pénétration dynamique (PDL et DPSH).
- Les essais au laboratoire sur les échantillons.

#### VI.3.1. Essais in situ

##### VI.3.1.1. Puits de reconnaissance :

L'exécution des puits a permis la définition de l'épaisseur de la « terre végétale » à décaper, la détermination de la position du niveau des eaux souterraines dans le cas où elles existent, l'observation visuelle des formations et des classifications lithologiques et la détermination de l'épaisseur des dépôts de couverture (de remblais, d'alluvion, d'éboulis, de terrasse, dunaires ou de croûtes de précipitation).

**Tableau VI.3 : Résumé des Puits de reconnaissance [7].**

Désignation Puit	Pk	Objectif	Profondeur (m)	Unité géologique	Terre végétale (m)
PR119	143+450	Zone de déblais	0,40	Pi	0,10
P315	144+275	Zone de déblais	1,80	Pi	0,20
PR120	144+710	Fondation des remblais	0,50	Pi	0,30
PR121	145+300	Zone de déblais	1,60	Pi	0,10
PR122	145+820	Fondation des remblais	0,40	Pi	0,10
P318	146+315	Zone de déblais	1,20	Pi	0,20
PR123	146+805	Fondation des remblais	0,80	Pi	0,10
P319	147+060	Zone de déblais	0,90	Pi	0,20
PR124	147+585	Fondation des remblais	0,90	Pi	0,30
PR125	149+820	Fondation des remblais	1,10	Pi	0,10
PR126	151+320	Zone de déblais	0,50	Pi	0,10
PR127	152+120	Fondation des remblais	0,50	Pi	0,10
PR128	153+070	Zone de déblais	0,50	Pi	0,10
PR129	153+370	Fondation des remblais / Buse	0,40	Pi	0,10
PR130	154+120	Zone de déblais	0,50	Pi	0,10
PR131	154+675	Fondation des remblais / Dalot	0,30	Pi	0,10

**VI.3.1.2. Sondages mécaniques carottés :**

Dans la plupart des cas les sondages mécaniques prévus dans le programme de prospection complémentaire ont été localisés avec l'objectif de connaître les caractéristiques géologiques géotechniques (ou de fournir des informations complémentaires) sur des terrains en zone de déblais de grands auteurs

Les autres sondages étaient prévus dans des zones de construction de grands remblais et/ou sur des dépôts alluvionnaires pour l'obtention de données géotechniques qui nous permettent d'analyser leur fondation et stabilité et de définir dans la fondation les dispositifs et les systèmes de drainage de type dalot.

L'objectif de ces essais était d'évaluer la compacité ou consistance des matériaux traversés, ainsi que la collecte d'échantillons avec l'échantillonneur Terzaghi pour pouvoir établir une classification lithologique.

**Tableau VI.4 : Résumé des Sondages mécaniques [7].**

Désignation Sondage	Pk	Profondeur (m)	Description lithologique
<b>SC107</b>	143+030	0.00-0.20	Terre végétale
		0.20-10.30	Tuf calcaire, avec des fragments de roches calcaires
		10.30-16.00	Sable compact et quelques fois dur
<b>SC108</b>	143+425	0.00-0.20	Terre végétale
		0.20-2.40	Tuf calcaire, avec des fragments de roches calcaires
		2.40-4.60	Argile rigide à très rigide
		4.60-18.40	Roche calcaire dure
<b>SC109</b>	153+075	0.00-0.30	Terre végétale
		0.30-9.70	Tuf calcaire, avec des fragments de roches calcaires
		9.70-10.60	Sable compact à dur
		10.60-12.00	Argile sableuse rigide à très rigide

**VI.3.1.3. Essais de pénétration dynamique :**

Les essais de pénétration dynamique ont pour objectif de calculer la résistance des terrains en continu (résistance dynamique de pointe) permettant, en conjugaison avec les moyens de prospection directs (puits et sondages), d'évaluer la capacité portante des couches les plus superficielles du terrain et/ou des dépôts de couverture généralement peu cohésifs ou compacts qui puissent avoir lieu, et de calculer leur épaisseur.

La résistance dynamique de pointe (qd) obtenue dans ce test est calculée à partir de la formule des Hollandais, dans laquelle outre les caractéristiques qui font partie de l'équipement utilisé, est inclus aussi le nombre de coups (Nd) et le nombre de tiges enfoncées dans le terrain [7].

$$q_d = \frac{M^2 \times H}{S \times [M + P]} \times \frac{Nd}{e}$$

M : Masse du mouton (63,5kgf)

H : Hauteur de chute (50cm ou 75cm)

S : Section de la pointe (15cm<sup>2</sup> ou 20 cm<sup>2</sup>)

P : Poids total du train de tiges (Masse endume + guidage mouton + masse des tiges)

e : Pénétration (chaque 20cm)

Ont été prévus 10 essais avec le pénétromètre dynamique super lourd (DPSH). Dans des zones de fondation des remblais, en lieux d'implantation de dalots / buses et/ou sur des dépôts de couverture peu compactes, ont été encore prévus 2 essais avec le pénétromètre dynamique léger (PDL).

**Tableau VI.5 : Résumé des essais de pénétration dynamique [7].**

Désignation Sondage	Pk	Objectif	Profondeur (m)	Unité Géologique	Résistance Dynamique	
					Prof. (m)	qd (MPa)
DPSH	144+070	Fondation des remblais / Dalot	1,0	Qal / Pi	0,0 – 0,2 0,2 – 1,0	1,0 6,0 - 30,0
DPSH	144+400	Fondation structure de passage à faune	0,60	Pi	0,0 – 0,2 0,2 – 0,6	1,0 6,0 - 30,0
DPSH	144+700	Fondation des remblais / Dalot	0,80	Pi	0,0 – 0,2 0,2 – 0,8	1,0 6,0 - 30,0
DPSH	145+700	Fondation des remblais / Dalot	0,80	Pi	0,0 – 0,4 0,4 – 0,8	1,0 – 3,0 15,0 - 30,0
DPSH	146+100	Fondation structure de protection de gazoduc	0,80	Pi	0,0 – 0,2 0,2 – 0,8	2,0 8,0 - 30,0
PDL	146+800	Fondation des remblais / Buse	0,80	Pi	0,1 – 0,8	3,0 - 30,0
PDL	147+580	Fondation des remblais / Buse	0,80	Pi	0,1 – 0,8	6,0 - 30,0
DPSH	152+000	Fondation des remblais / Dalot	0,60	Pi	0,1 – 0,6	6,0 - 30,0
DPSH	152+127	Fondation structure de passage à faune	0,40	Pi	0,1 – 0,4	6,0 - 30,0
DPSH	153+400	Fondation des remblais / Buse	2,2	Qal / Pi	0,0 – 0,6 0,6 – 1,4 1,4 – 2,2	1,0 – 8,0 8,0 – 6,0 7,0 - 30,0
DPSH	153+825	Fondation des remblais / Buse	0,80	Pi	0,0 – 0,4 0,4 – 0,8	1,0 – 3,0 9,0 - 30,0
DPSH	154+650	Fondation des remblais / Dalot	0,80	Pi	0,0 – 0,2 0,2 – 0,8	1,0 3,0 - 30,0

### **VI.3.2. Les essais au laboratoire**

Concernant les essais de laboratoire a été établi dans le programme de prospection complémentaire un ensemble d'essais qui permettent l'obtention des caractéristiques et paramètres géotechniques des matériaux terreux et rocheux

Sur les échantillons récoltés ont été exécutés des essais avec l'objectif de caractériser et identifier les sols conformément aux classifications Française (GTR - LCPC/SETRA) et en conformité avec le code UIC 719R.

#### **VI.3.2.1. Les essais d'identifications physiques :**

##### **VI.3.2.1.1. Analyse granulométrique (selon la norme NF P.94 056/NF P.94 057) :**

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains. Elle s'effectue :

- Par tamisage pour des grains d'un diamètre supérieur à 80 µm jusqu'à 100 mm
- Par sédimentométrie pour les grains les plus fines

##### **VI.3.2.1.2. Teneurs en eau (selon la norme NF P.18-598) :**

Le but de l'essai c'est la détermination de la quantité d'eau contenue dans un échantillon de sol (W) : qui est le Rapport entre la masse d'eau « interstitielle » ou « libre » dans une masse de sol donné et la masse des particules solides du sol « sec ».

##### **VI.3.2.1.3. Limites d'Atterberg (selon la norme NF P.94 – 051) :**

Le but de l'essai c'est la détermination des deux limites d'Atterberg :

- Limite de Liquidité : WL (frontière entre état plastique et liquide)
- Limite de Plasticité : WP (frontière entre état solide et plastique)
- Indice de plasticité :  $IP = WL - WP$ .

##### **VI.3.2.1.4. Equivalent de sable (selon la norme NF P.18-598) :**

L'équivalent de sable (ES) est un essai qui permet de mesurer la propreté du sable.

### **3.2.2. Les essais chimiques :**

#### **VI.3.2.2.1. Valeur au bleu de méthylène VBS (selon la norme NF P94-068) :**

L'essai au bleu de méthylène, ou « essai au bleu », est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol.

L'essai consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans l'échantillon Pour cela on utilise du bleu de méthylène, substance adsorbée de préférence par les argiles.

#### **VI.3.2.3. Essais mécaniques :**

##### **VI.3.2.3.1. Essai Proctor modifié (selon la norme NF P94-093) :**

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée « teneur en eau optimum Proctor ».

##### **VI.3.2.3.2. Essai CBR (selon la norme NF P 94-078) :**

L'essai CBR permet de réaliser la caractérisation mécanique des sols naturels et de sols compactés dans des remblais et des couches de forme, de fondations et de sous-fondations

## VI.3.3. Résultats des essais au laboratoire :

Tableau VI.6 : Résumé des résultats des essais de laboratoire [7].

Puit n°	Pk	Granulométrie (% qui passe sur le tamis)			Limites d'Atterberg (%)		ES	VBS	Teneur en eau (%)
		Φ 10 2mm	Φ 40 0,42mm	Φ 200 0,074 mm	LL	IP			
SC107	143+030	97	91	56	38	22	-	-	13,3
SC107	143+030	93	77	22	-	-	-	-	18,1
SC108	143+425	100	100	100	73	54	-	-	20,8
PR119	143+450	94	88	52	29	10	-	-	-
P315	144+275	64	59	48	78	37	4,4	0,19	-
PR121	145+300	76	67	40	39	14	-	-	8,1
P318	146+315	55	38	20	-	-	16,7	0,13	-
P319	147+060	43	36	22	-	-	15,8	0,14	-
PR124	147+585	49	41	23	31	9	-	-	-
P319a	147+900	59	51	34	-	-	19,0	0,22	-
P319a	147+900	56	46	27	-	-	8,1	0,34	-
PR125	149+820	85	64	47	38	15	-	-	11,5
PR126	151+320	67	62	36	35	10	-	-	12,8
SC109	153+075	89	84	10	-	-	-	-	-
PR129	153+370	58	52	26	-	-	-	-	-
PR130	154+120	52	45	27	-	-	-	-	-

Tableau VI.7 : Résumé des résultats des essais Proctor et CBR [7].

Puit n°	Proctor modifié		Indice CBR % (100% PM)
	Wopt (%)	$\gamma_{dmax}$ (KN/m <sup>3</sup> )	
<b>P315</b>	10.7	16.5	-
<b>PR121</b>	17.3	17.2	45.0
<b>P318</b>	8.4	17.4	-
<b>P319</b>	4.4	18.8	-
<b>PR125</b>	17.9	17.3	32.7
<b>PR126</b>	21.0	16.2	12.5
<b>SC109</b>	10.3	20.0	51.8
<b>PR130</b>	16.8	15.3	52.3

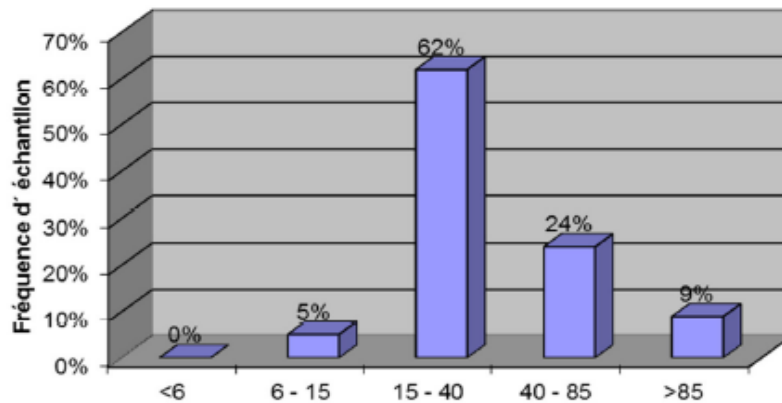
$\gamma_d$  : Densité sèche (t/m<sup>3</sup>) ; **Wopt** : Teneur en eau optimale (%)

Les valeurs obtenues pour l'indice de capacité de support du pavé (CBR), elles varient entre 12,5% et 52,3%. Ayant en compte que le résultat correspond à l'indice de CBR pour 100% du PM, les résultats correspondent à des valeurs généralement habituelles pour les types de sols testés.

**VI.3.4. Interprétation des résultats :**

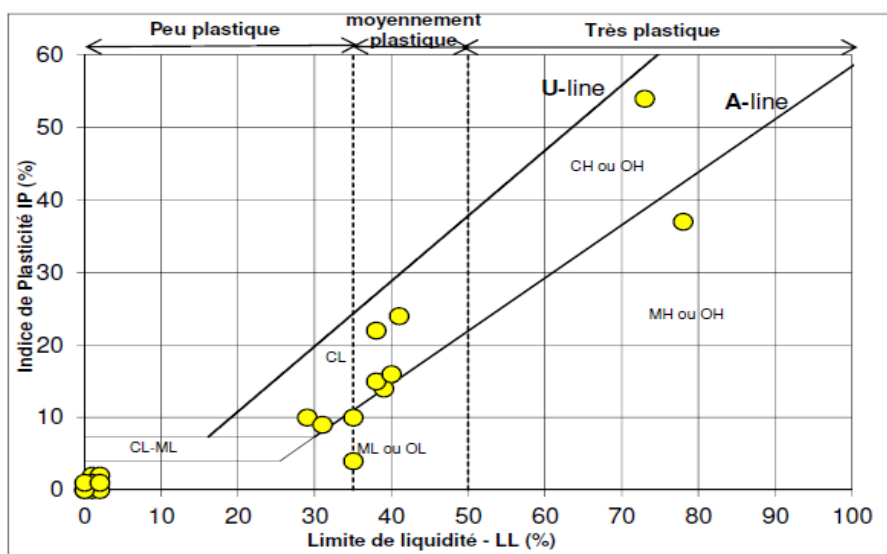
Ayant pour base les essais de laboratoire réalisés sur les échantillons ont été obtenus les résultats suivants :

Concernant le pourcentage des fins bien que la plupart des échantillons (62%) se situe dans l'intervalle entre 15% et 40%, cependant il y a un pourcentage significatif d'échantillons (33%) avec plus de 40% de fins, bien qu'ils contiennent normalement des pourcentages de matériaux graveleux (supérieurs à 2mm).

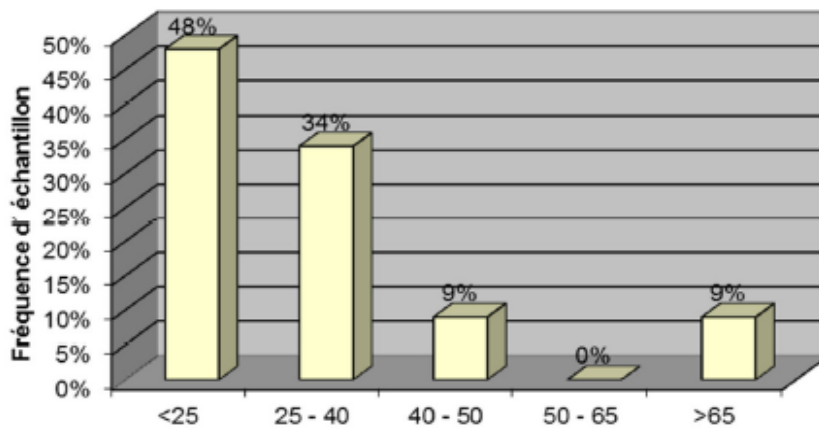


**Figure VI.5 : Représentation des résultats des valeurs du % de fins (<#200) des échantillons)**

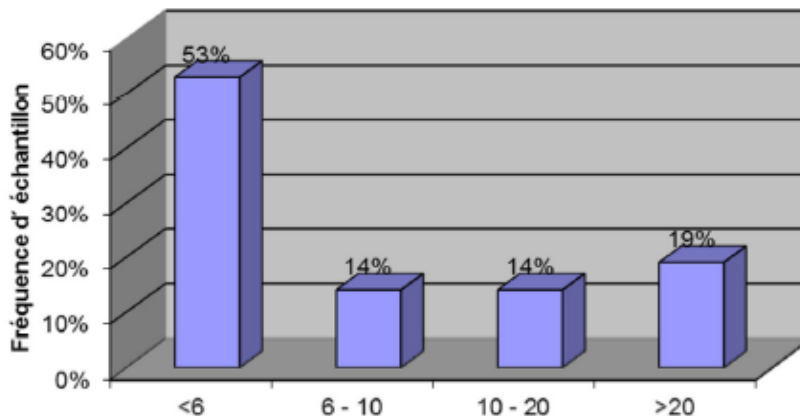
Dans les essais de détermination des limites de plasticité (limites d'Atterberg) des sols il est constaté que dans une partie des échantillons il n'a pas été possible de mesurer la plasticité (non mesurable). Dans ces cas ils correspondront généralement à des sols non plastiques ou de plasticité très basse. Dans la plupart des échantillons, où il été possible de déterminer les limites de plasticité, s'est vérifié que la limite de liquidité (LL) obtenue correspond on la plupart des situations (82%) à des valeurs jusqu'à 40% et que l'indice de plasticité (IP) se situe en 81% des échantillons dans la gamme entre 6% et 20%, c'est-à-dire, correspondant essentiellement à des sols de plasticité basse à moyenne.



**Figure VI.6 : Représentation dans la carte de plasticité des sols**



**Figure VI.7 : Représentation des résultats des valeurs de limite de liquidité (LL) des échantillons**



**Figure VI.8 : Représentation des résultats des valeurs de l'indice de plasticité (IP) des échantillons**

Quant aux valeurs des essais de l'équivalent de sable (ES), elles varient seulement entre 19,0 et 4,4, correspondant à des valeurs relativement réduites qui reflètent clairement le pourcentage significatif de fins et de matériaux graveleux (supérieurs à 2mm) qui existent dans ces sols.

En ce qui concerne les essais de bleu de méthylène (VBS) les valeurs obtenues entre les 0,34 et 0,13 sont clairement en conjugaison avec les valeurs obtenues dans les essais des limites d'Atterberg, indiquant qu'il s'agit de sols sans plasticité ou avec peu de plasticité, et peu expansifs.

En ce qui concerne les essais de compacité Proctor modifiée réalisés sur des échantillons de sols, les valeurs de la masse volumique sèche maximale,  $\gamma_{dmax.}$ , se situent entre 15,3 et 20,0  $KN/m^3$ , avec une valeur moyenne 17,0  $KN/m^3$ , tandis que la teneur en eau optimale,  $W_{opt.}$ , varie entre 4,4% et 21,6%, avec une valeur moyenne de 13,6%.

Les valeurs obtenues pour l'indice de capacité de support du pavé (CBR), elles varient entre 12,5% et 52,3%. Ayant en compte que le résultat correspond à l'indice de CBR pour 100% du PM, les résultats correspondent à des valeurs généralement habituelles pour les types de sols testés.

### VI.3.5. Classification des sols :

On a deux classifications du sol selon GTR et UIC719.

#### VI.3.5.1. Classifications selon GTR :

Dans la Classification Française GTR (LCPC/SETRA), on les sols échantillonnés sont prédominants les sols de la classe C1B5 (graviers limoneux) avec 39%. Les sols des classes A2 (argiles marneuses peu plastiques) et B5 (sables très limoneux) sont aussi significatif, respectivement avec un pourcentage de 19% et 14%. Les restants échantillons se distribuent avec un pourcentage entre 4% et 9% par les classes A1 (limons peu plastiques), A3 (limons et argiles plastiques), A4 (argiles marneuses très plastiques), B2 (sables peu argileuses) et C1A1 (limons ou argiles peu plastiques comportant des gros éléments).

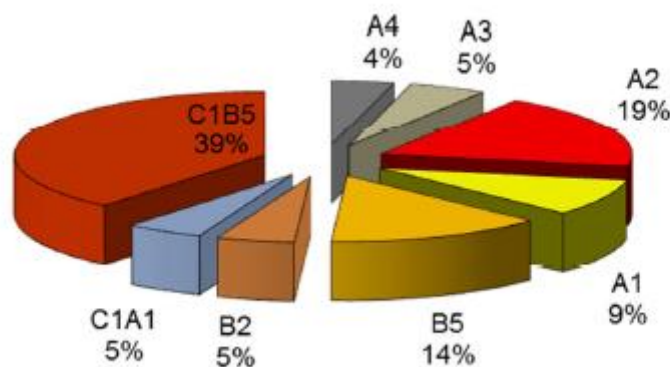


Figure VI.9 : Représentation du % des classes de la Classification GTR (LCPC/SETRA) des échantillons

#### VI.3.5.2. Classification selon UIC (719 R) :

Dans la classification selon le code UIC 719R les sols du complexe Pliocène (Pi) s'encadrent dans leur plupart (86%) dans la classe QS1, c'est-à-dire des sols « médiocres », acceptables tels quels, dont on doit toujours se préoccuper du bon drainage. Les autres 14 correspondent à des sols de la classe QS0 (sols impropres) avec 9% et à des sols de la classe QS2 (sols moyens) avec 5%.

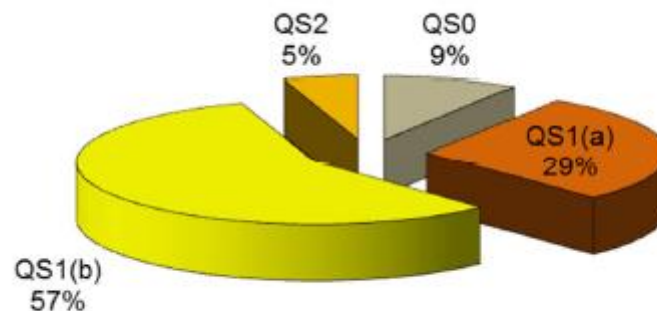


Figure VI.10 : Représentation du % des classes de la Classification UIC 719R des échantillons

**Tableau 6.8 Classification GTR et UIC719R Pour les différents sols**

Puit n°	PK	Classifications	
		GTR (LCPC/SETRA)	UIC 719R
SC107	143+030	A2	QS1(a)
SC107	143+030	R43	QS1(b)
SC108	143+425	A4	QS0
SC108	143+425	R22	QS1(b)
P315	144+275	A3	QS0
PR121	145+300	A2	QS1(a)
P318	146+315	C1B5	QS1(b)
P319	147+060	C1B5	QS1(b)
P319a	147+900	C1B5	QS1(b)
PR125	149+820	A2	QS1(a)
PR126	151+320	C1A1	QS1(b)
SC109	153+075	B5	QS1(b)
PR130	154+120	C1B5	QS1(b)

La majorité du sol rencontré le long de notre trace est de qualité QS1

#### **VI.4. Conclusion :**

Avant de réaliser n'importe quel projet on doit passer par une étude géotechnique générale du terrain correspond, cette étude doit être précise et réalisée par des ingénieurs et main d'œuvre qualifiés pour assurer la facilité des terrassements, la bonne fondation et la durabilité du notre projet.

**Chapitre VII**  
**Terrassement et**  
**structure d'assise**

## VII.1. Terrassements

Le terrassement est le travail consistant à déplacer des quantités importantes de matériaux (sols, roches, sous-produits, etc.) dans divers buts. Le remaniement des terrains naturels entraîne une modification généralement définitive de la topographie et du paysage.

### VII.1.1. Travaux de préparation du terrain

#### VII.1.1.1. Débroussaillage et essartage

Dans la zone à occuper par les travaux de terrassement et de drainage doit être fait un nettoyage général de la surface du terrain, avec abattage de la végétation sous-arbustive et herbacée, des arbustes et des arbres de diamètre inférieur à 20 cm et hauteur jusqu'à 1,0m (comprenant les racines).

#### VII.1.1.2. Décapage de terre végétale

Selon ce qui est établi dans l'étude géologique – géotechnique, dans notre tronçon ont été considérés pour l'effet de mesurage des épaisseurs moyennes de décapage entre 0.20m et 0.30m, tel qu'indiquées dans le tableau VII.1.

**Tableau VII.1 : Synthèse des valeurs de décapage moyen estimés**

Localisation (Pk de projet)	Extension (m)	Décapage (m)
142+000 – 143+900	1900	0,20
143+900 – 145+100	1200	0,30
145+100 – 153+175	8075	0,20
153+175 – 153+975	800	0,30
153+975 – 155+000	1025	0,20

### VII.1.2. Déblais

Dans ce tronçon une grande partie des tronçons d'excavation prévus présentent des hauteurs petites (inférieures ou égales à 5m). Les restants déblais atteindre hauteurs maximales à l'axe et on le talus de 6m.

#### VII.1.2.1. Méthodes d'excavation

Pour la détermination du mode d'excavation des formations à consistance rocheuse affectées par le tracé, ont été utilisés les paramètres résistance à la compression simple des matériels et/ou valeur du RQD obtenu dans les sondages mécaniques, à partir d'abacos de la méthode de Franklin (1971) représentée sur la Figure.

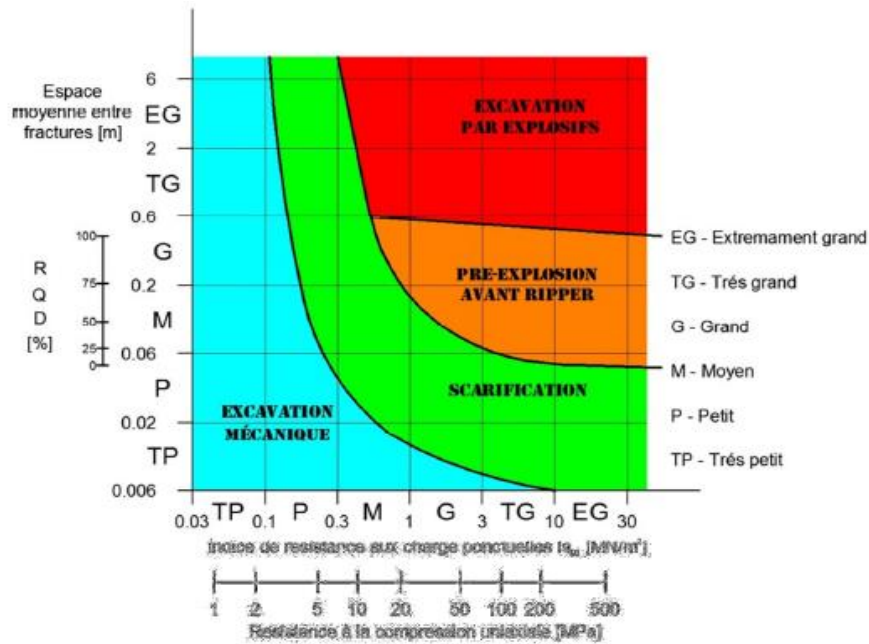


Figure VII.1 : Classification du mode d'excavation des massifs rocheux (Franklin et al, 1971) [7].

**VII.1.2.2. Classification des matériaux en vue de leur réutilisation**

La classification des matériaux excavés en vue de leur réutilisation a été faite basée sur ce qui est défini par le code UIC 719R pour ouvrages en terre et couches d'assises ferroviaires.

Tel qu'établi dans le code UIC 719R les matériaux sont classifiés selon les classes de qualité des sols indiquées dans le Tableau.

**Tableau VII.2 : Classes de qualité des sols selon le code UIC 719R.**

Type de sol (classification géotechnique)	Classe de qualité des sols
Sols organiques. Sols avec plus de 15% de fins, expansifs, humides, de haute plasticité et pas Compactables. Sols contaminés avec déchets, matière organique ou résidus. Sols avec matériaux solubles (sel-gemme ou plâtre).	QS0
Sols avec plus de 40% de fins (pas classifiables comme QS0). Roches évolutives.	QS1.1
Sols avec 15% à 40% de fins (pas classifiables comme QS0). Roches friables. Roches peu dures (MDE > 40 et LA >40%).	QS1.2
Sols avec 5% à 15% de fins. Sols avec moins de 5% de fins mais uniformes (Cu s 6). Roches moyennement dures (25% < MDE s 40% et 30% < LA s 40%)	QS2
Sols avec moins de 5% de fins. Roches dures (MDE s 25% et LA s 30%).	QS3

Ayant pour base les définitions techniques du Code UIC 719R, sont présentées dans le Tableau (voir **Annex C**), les conditions générales de réutilisation des matériaux dans les différentes parties de l'ouvrage (corps du remblai, partie inférieure du remblai, partie supérieure du remblai, couche de forme, couche de fondation, éperons, masques, couches drainantes, bétons et sous-ballast).

-Ainsi, selon ce qui est mentionné dans l'Etude Géologique et Géotechnique le pourcentage estimé de réutilisation des matériaux des déblais rencontrés le long du tracé dans les déblais et sa classification UIC, est résumé au tableau **VII.3**.

**Tableau VII.3 : Estimation du % de réutilisation des matériaux excavés dans le tronçon ayant pour base le code UIC 719R.**

Localisation déblai (Pk de projet d'exécution)	Unité géologique	Type de Matériaux excavés	Classifications de matériaux Selon UIC 719R	% De le Matériaux réutilisables	% pour Dépôt
142+675-143+600	Pi / Ci	Sols, sols roche et roche	QS0 QS1(a) QS1(b)	95	5
144+200-144+400	Pi	Sols	QS0 QS1(a) QS1(b)	95	5
145+075-145+425	Pi	Sols	QS0 QS1(a) QS1(b)	95	5
146+150-146+625	Pi / Ci	Sols, sols roche et roche	QS1(a) QS1(b)	95	-
146+950-147+200	Pi	Sols et sols roche	QS1(a) QS1(b)	95	-
151+000-151+750	Pi / Ci	Sols, sols roche et roche	QS1(a) QS1(b)	95	-
152+775-153+175	Pi	Sols et sols roche	QS1(b) QS2	95	-
153+900-154+325	Pi	Sols et sols roche	QS1(b) QS2	95	-

La plupart des sols qui seront excavés présentent de l'aptitude géotechnique adéquate pour leur colocation dans les différentes parties qui constituent les remblais

#### VII.1.2.3. Géométries des talus de déblai

La généralité des talus d'excavation intéressera des terrains avec comportement essentiellement de sols ou de roche très altère et fracturée, a été considéré que l'adoption d'une géométrie générale de 2/3 (V/H) garantira la stabilité des talus d'excavation face aux hauteurs prévues pour eux.

#### VII.1.2.4. Revêtement et drainage des talus de déblai

Comme méthodologie générale a été prévu que, dans tous les talus avec inclinaisons prévues de 2/3 (V/H), outre la mesure d'arrondissement de la crête, soit fait le revêtement avec au moins 0,15m d'épaisseur de "terre végétale" et espèces végétales adéquates immédiatement après l'ouverture des excavations avec l'objectif d'éviter l'effet érosif du ruissellement superficiel.

En ce qui concerne le drainage superficiel des talus d'excavation est prévue comme méthodologie générale l'installation de fossés de drainage dans la crête des talus et dans les banquettes, pour réduire le ruissellement sur les talus.

**VII.1.2.5. Analyses de stabilité globale des talus de déblai**

Les analyses de stabilité globale réalisées ont eu pour objectif la validation des géométries adoptées dans les talus dans les zones de déblai, ayant pour base les résultats des essais de prospection géotechnique existantes.

Les principaux paramètres géotechniques employés dans les analyses de stabilité des déblais/remblais sont les suivants :

- Poids spécifique
- Cohésion effective C'
- Angle Frottement interne  $\phi$  (°)

**Tableau VII.4 : Paramètres géotechniques adoptés dans l'analyse au PK 143+450.**

Formation/ Description (profondeur)	Poids Volumique (kN / m3)	C (kPa)	Angle Frottement interne $\phi$ (°)
Marne gréseux (0,0 à 4,5m)	21	5	35
Roche calcaire dure (> 4,5m)	22	-	-

On utilise software Slide 6.0, basé sur la méthode de Bishop, du facteur de sécurité minimum associé à des mécanismes de rupture circulaires. Les facteurs de sécurité minimale supérieurs à 1.5 à long terme et 1.3 court terme, 1.1 pour séisme, voir **Annexe C**.

**VII.1.3. Remblais**

Dans le Tableau est présentée une synthèse des caractéristiques principales des zones de remblai dans lequel sont indiquées, parmi d'autres, leur localisation, la hauteur maximale des remblais à l'axe, les pentes prévues pour les talus et, quand nécessaire.

**Tableau VII.5 : Résumé les principales caractéristiques des zones de remblais.**

Localisation (Pk de Projet d'exécution)	Extension (m)	Hauteur Maximale axe (m)	Inclination de talus (V/H)	
			Gauche	Droit
142+000-142+675	675	3.20	1/2	1/2
143+600-144+200	600	8.12		
144+400-145+075	675	5.20		
145+425-146+150	725	6.90		
146+625-146+950	325	2.4		
147+200-151+000	3800	4		
151+750-152+775	1775	7.6		
153+175-153+900	775	7.8		
154+325-155+000	675	7.8		

En fonction des caractéristiques topographiques de la zone traversée, et face aux contraintes géométriques dans l'implantation du rasant du tracé, est constaté que les remblais qu'il faut construire présentent des hauteurs peu significatives, l'axe atteignant la hauteur maximale entre 7m et 8m.

#### VII.1.3.1. Géométrie des talus de remblais

En ce qui concerne les pentes des talus de remblai, ayant en considération les hauteurs prévues, la nature des matériaux à réutiliser et les conditions prévisibles de fondation des remblais, a été adopté une géométrie générale avec pente de 1/2 (V/H).

#### VII.1.3.2. Protection superficielle des talus en remblais

Avec l'objectif d'éviter le ravinage provoqué par la circulation des eaux superficielles, est prévu le revêtement des talus de remblai, avec 0,15 m d'épaisseur de "terre végétale" et des espèces végétales adéquates, immédiatement après l'exécution des remblais.

#### VII.1.3.3. L'analyse de stabilité des talus de remblais

Les analyses de stabilité ont été réalisées avec l'objectif de vérifier les critères qui supportent la géométrie proposée pour les talus de remblai.

Ayant en considération que pour la totalité des talus de remblai a été adoptée la même inclinaison, a été analysé seulement un profil au PK 144+050, correspondant au l'endroit où ira se vérifier la plus grande hauteur à l'axe et on les talus, correspondant aussi à un remblai où ira se vérifier l'existence de sols de fondation avec des caractéristiques plus mauvaises de support, où sera fait une petite purge de la fondation.

**Tableau VII.6 : Paramètres géotechniques adoptés dans l'analyse du Profil au PK 144+050**

Formation/ Description (profondeur)	Poids Volumique (kN / m <sup>3</sup> )	C (kPa)	Angle Frottement interne $\phi$ (°)
Remblai	20	1	36
Remblai granulaire	21	0	40
Marne gréseux (0,0 à 4,5m)	21	5	35
Roche calcaire dure (> 4,5m)	22	-	-

Dans tous les profils analysés ont été obtenus des coefficients de sécurité globale supérieurs aux minimums établis, étant considérée ainsi garantie la sécurité des talus quant à la stabilité globale.

#### VII.1.4. Calcule des cubatures

Les cubatures sont les calculs effectués pour avoir les volumes des terrassements existants dans notre projet.

Le calcul des cubatures de terrassement a été fait à l'aide du logiciel « CIVIL 3D », les tableaux ci-après résumant les résultats obtenus : (les résultats détaillés dans annexe C)

Tableau VII.7 : Volumes des terrassements.

Terrassement	Remblais	Déblais
Volume (m <sup>3</sup> )	319083.88	370073.588

Tableau VII.8 : Volume des couches d'assise ferroviaire.

Assise ferroviaire	Ballast	Sous ballast	Couche de fondation	Couche de forme
Volume (m <sup>3</sup> )	31250.72	27 383.840	25 549.030	42 220.667

## VII.2. Structure d'assise :

Les couches d'assise contribuent à assurer, par leur nature et leur épaisseur, le bon comportement de la voie ferrée du point de vue rigidité, et la répartition des charges exercées par les traverses sur la plate-forme. Les couches d'assise aussi amortir les vibrations de la superstructure

L'épaisseur et la nature des couches d'assises dépendent des paramètres suivants :

- L'importance trafic (tonnages, charges, vitesses).
- Les caractéristiques hydrogéologiques et climatiques du site.
- Les caractéristiques du sol de plate-forme (la portance, sensibilité à l'eau et au gel).
- Les caractéristiques de l'armement (profil de rail, nature et espacement des traverses).

### VII.2.1. Les constituants de la structure d'assises :

Les couches d'assise sont composées de couche de ballast, la sous-couche, et la plateforme.

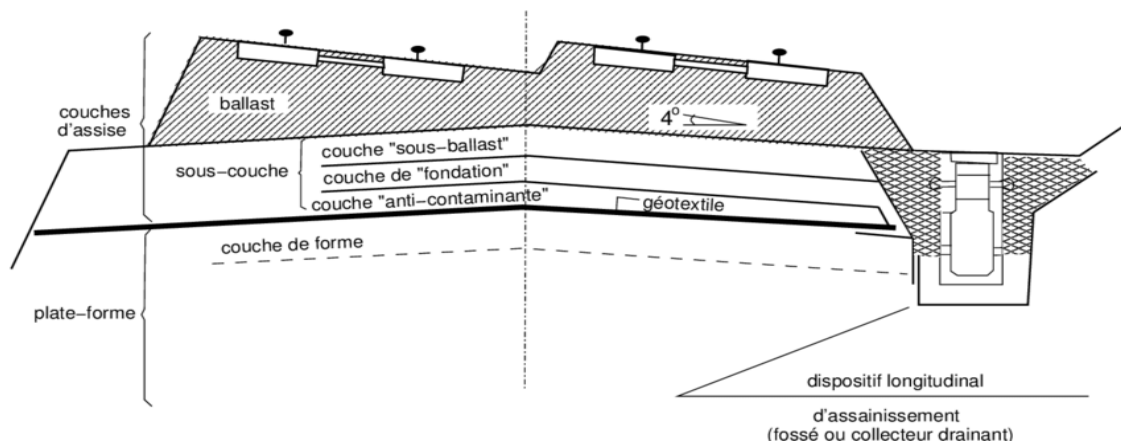


Figure VII.2 : Les différentes couches de la structure d'assises.

#### VII.2.1.1. Le ballast :

La couche de ballast est placée dans la partie supérieure de la structure d'assise, sous les traverses. Elle est composée d'un matériau granulaire ( $d/D = 25/50$  mm).

Les grains de ballast proviennent du concassage de roches extraites dans des carrières de pierres dures (granit, rhyolite, diorite, grès).

L'épaisseur de la couche selon la **SNTF** est indiquée dans le tableau ci-dessous :

Tableau VII.9 : Epaisseur du ballast [6].

Épaisseur normale	0,30m
Cas des viaducs et tunnels	0,35m

**-Le rôle du ballast :**

- Dégradation et transmission uniforme à la plate-forme des charges transmises par les traverses
- Assurer la stabilité des traverses dans les deux sens
- Amortir une part des vibrations induites par les circulations
- Simplification des opérations d'entretien de la voie
- Evacuation des eaux pluviales.

**VII.2.1.2. La sous-couche :**

C'est une couche d'adaptation interposée entre le ballast et la plateforme. La sous-couche peut être mono ou multicouche, elle comprend une couche sous-ballast puis une couche de fondation, et enfin s'il y a lieu, une couche anti contaminant en sable complétée par une feuille géotextile

Cette sous-couche est pentée transversalement de 3 à 5 %.

**-La couche de sous-ballast :**

Cette couche existe dans tous les cas, cas, même sur les plateformes rocheuses ou elle sert de couche d'égalisation et contribue à réduire la raideur de l'assise, elle est en grave propre bien graduée 0/31.5 mm comportant au moins 30% du matériau concassé ayant une DRG  $\geq 12$  et compacté a 100% OPN [3].

**-La couche de fondation**

C'est une couche en grave propre bien graduée, compactée a 95 % OPN, et d'une épaisseur de 15 cm minimum, la DRG exigé est  $\geq 10$ . Elle protège la plateforme contre l'action des engins lors de la construction de la voie et utilisée sur les sols médiocres.

**-La couche anti contaminante :**

Cette couche est en sable moyen propre d'une épaisseur minimale de 15 cm, elle est complétée en outre par une feuille de feutre synthétique (Géotextile). Pour éviter la contamination de la sous-couche par les éléments fins de la plateforme.

**-Le rôle de sous-couche :**

- L'amélioration de la portance et meilleure répartition des charges transmises.
- La Protection contre l'érosion et le gel.
- Améliorer le drainage
- Anticontamination entre la plateforme et la couche de ballast.
- Contribution à l'amélioration des propriétés vibratoires [3].

**VII.2.1.3. La plateforme :**

Elle constituée de sol rapporte (remblais) en place (déblais), sa partie supérieure est aménagée en couche forme, de pente transversale de 4 % pour notre projet

**Cas d'un remblai :** cette couche de forme est constituée soit, du même sol que le corps de remblai, soit d'un sol de qualité meilleure son taux de compactage est de 95 % de OPM

**Cas d'un déblai :** la couche de forme est obtenue par compactage du fond de fouille à 95% sur une épaisseur minimale de 30 cm.

**VII.2.2. Classes de qualité des sols :**

La qualité d'un sol dépend des deux paramètres ci-après :

La nature géotechnique du sol

Les conditions hydrogéologiques et hydrologiques locales.

Selo l'UIC fiche 719R, On distingue les quatre classes de qualité QSi de sols ci-dessous :

**QS0** : Sols impropres

**QS1** : Sol médiocre.

**QS2** : Sols moyens.

**QS3** : Bons sols.

- La classe de sol prépondérante dans cette zone est de classe **QS1**

**VII.2.3. Classe de portance des plateformes :**

La portance d'une plate-forme dépend de :

La qualité du sol constituant le corps de remblai ou du sol en place du fond de déblai

La qualité et l'épaisseur de la couche de forme (lorsqu'elle existe)

En fonction de ces paramètres sont définis, selon le code UIC719R, trois types de plate-forme (correspondantes à trois classes de capacité de support) :

**P1** : plate-forme de médiocre qualité

**P2** : plate-forme de moyenne qualité

**P3** : plate-forme de bonne qualité

**Tableau VII.10 : La classe de portance des plateformes [9].**

Classe de qualité des sols	Classe de portance Envisagée pour la plate-forme	Couche de forme à mettre en œuvre Pour obtenir cette classe de portance	
		Classe de qualité	Epaisseur en m
<b>QS1</b>	P1	QS1	-
	P2	QS2	0.50
	P2	QS3	0.35
	<b>P3</b>	QS3	0.50
<b>QS2</b>	P2	QS2	-
	P3	QS3	0.35
<b>QS3</b>	P3	QS3	-

- Classe de portance des plateformes de notre projet est P3 « plate-forme de bonne qualité » et on a un matériau majoritaire QS1 donc on va utiliser matériaux QS3 avec une épaisseur de 50 cm

**VII.2.4. Calcul de l'épaisseur minimale e de la couche d'assise :**

L'épaisseur des couches d'assise (**e**), est donnée par l'ensemble du ballast et de la couche de sous couche.

Le dimensionnement de cette épaisseur est fait à partir de la formulation qui est indiquée dans le code UIC 719R (expression suivante), en fonction des paramètres adéquats au tronçon qui est en train d'être étudié.

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

« e » en mètre

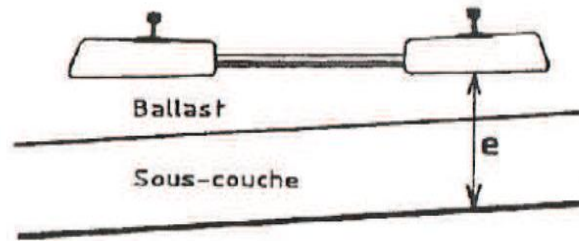


Figure VII.3 : L'épaisseur de la couche d'assise.

**Tel que :**

$e$  : L'épaisseur de la couche d'assise

Dépend des facteurs suivants :

$E$  : facteur dépendant des classes de portance.

$a$  : facteur dépendant de groupe de l'UIC (groupe 1 à 6, UIC 714).

$b$  : facteur dépendant de type de traverse.

$c$  : facteur dépendant des conditions de travail.

$d$  : facteur dépendant de la charge maximale d'essieu des véhicules.

$f$  : facteur dépendant de la vitesse.

$g$  : facteur dépendant de l'installation de géotextiles.

**Remarque :** Les paramètres de la formule de calcul d'épaisseur sont mentionnés dans l'annexe C

**VII.2.5. Application à notre projet :**

Les valeurs des paramètres de la formule de calcul d'épaisseur :

**$E=0.45$  m** car notre plate-forme est de classe P3.

**$a=0.00$  m** car la vitesse de notre projet est supérieure à **160km/h**

**$b=(2.5-L)/2=(2.5-2.41)/2=0.045$  m** car on a des traverses en béton monobloc de longueur  $L=2.41$ m.

**$c=0.00$**  dimensionnement normal.

**$d=0.05$  m** la charge nominale maximale d'essieu= **225kN**.

**$f=0.00$  m** pour les plates-formes de portance P3, des lignes parcourues à grande vitesse.

**$g=0$**  pas de géotextile car la couche de forme est en sol QS3.

En appliquant la formule, on obtient :

$$e = 0.45 + 0 + 0.045 + 0 + 0.05 + 0 + 0 = \mathbf{0.55 \text{ m}}$$

Les épaisseurs des différentes couches seront comme suit :

- Ballast: 30 cm.
- Sous-ballast: 25 cm.
- Couche de forme de type QS3 : 50 cm.
- Épaisseur totale de la plateforme : 105 cm.

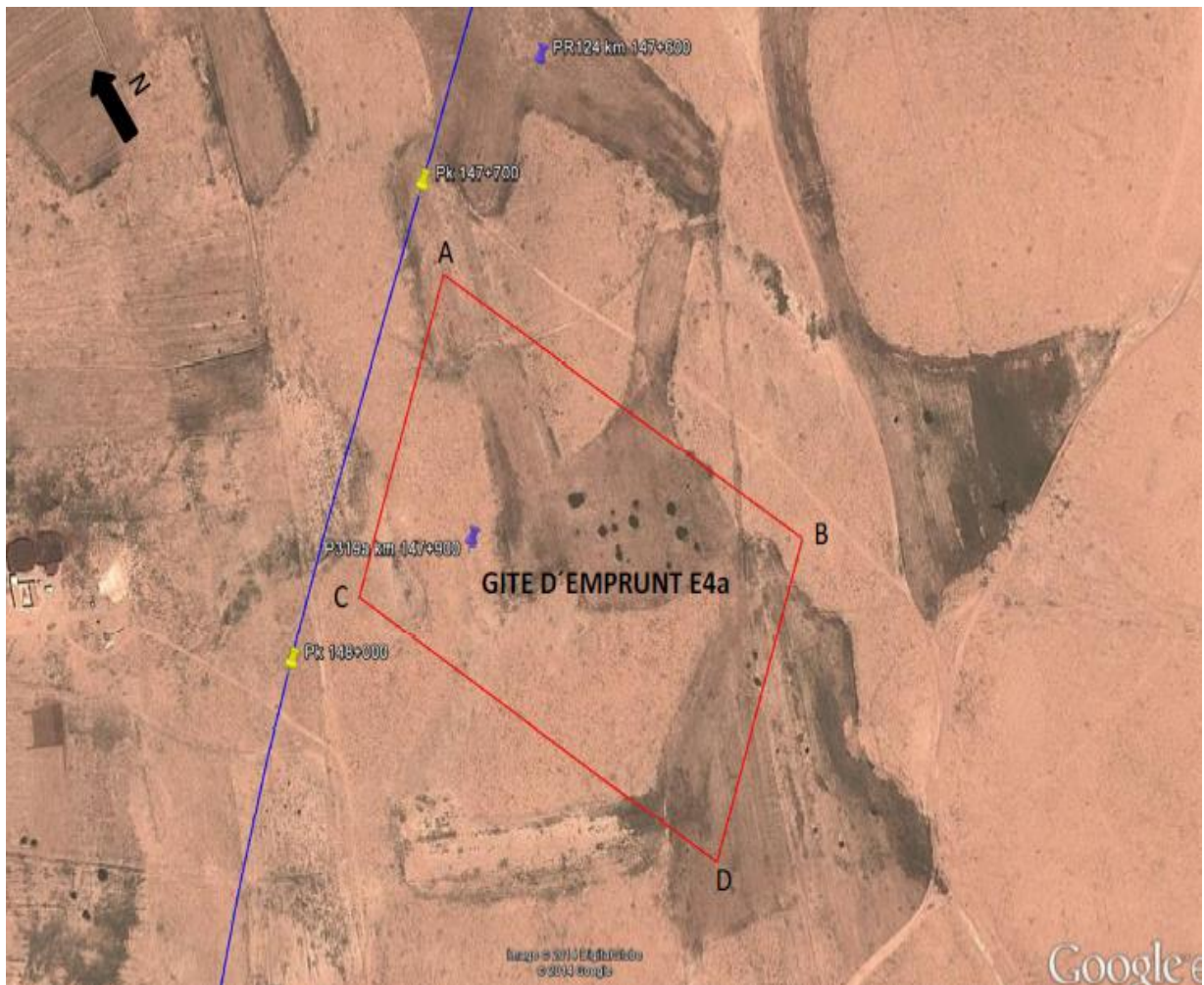
### VII.3. Gite d'emprunt :

L'étude de l'APD permet de trouver deux zones possibles pour la fourniture de matériaux (nommées E4a et E4b). Pour la construction de remblai.

Les gites d'emprunts de notre projet sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau VII.11 : Les gites d'emprunts utilisé et leur caractéristique**

Gites d'emprunts	PK	Volume (m <sup>3</sup> )	Formation	Classification	
				GTR	UIC
E4a	147+700 à 148+000	60.000m <sup>3</sup>	Pi	C1B5 et B5	QS1
E4b	153+900 à 154+100	60.000m <sup>3</sup>	Pi	C1B5	QS1



**Figure VII.4 : Plan de localisation gite E4a**



Figure VII.5 : Plan de localisation gite E4b

**Chapitre VIII**  
**Étude hydrologique et**  
**assainissement**

### VIII.1. Étude hydrologique :

L'étude hydrologique des bassins versants des oueds traversant le nouveau tracé du chemin de fer a pour objectif l'estimation des débits de pointes de crues pour différentes périodes de retour (10, 20, 50 et 100 ans), nécessaires au dimensionnement des ouvrages hydrauliques, ponts et ponceaux, ainsi qu'aux autres équipements de drainage tels que les canalisations en fossés.

#### VIII.1.1. Considérations générales :

Le tracé de la ligne de chemin de fer, Boughzoul – Djelfa traverse le long de son parcours de Nord au Sud, les sous bassins hydrographiques :

- Sous bassin versant de l'oued Cheliff (BV 01).
- Sous bassin versant de l'oued Zahrez (BV 17).

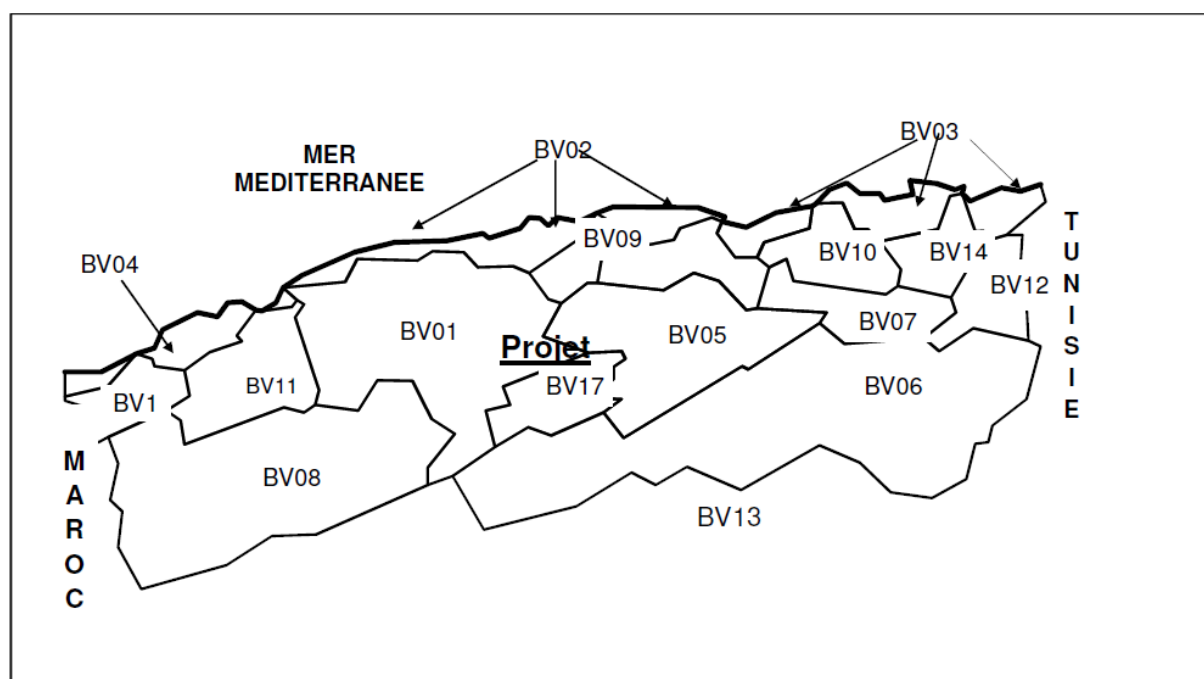


Figure VIII.1 : Carte de situation de la région d'étude

Tableau VIII.1 : Les 17 grands bassins hydrographiques de l'Algérie.

Code	Bassin	Code	Bassin	Code	Bassin
01	Cheliff	07	Hauts Plateaux Constantinois	13	Sahara
02	Côtiers Algérois	08	Hauts Plateaux Oranais	14	Seybouse
03	Côtiers Constantinois	09	Isser	15	Soummam
04	Côtiers Oranais	10	Kebir Rhumel	16	Tafna
05	Chott Hodna	11	Macta	17	Zahrez
06	Chott Melhir	12	Medjerdah		

Le régime hydrologique de la région de l'étude est caractérisé par une pluviométrie faible et irrégulière au cours de l'année. Les écoulements des oueds sont temporaires. Les oueds sont secs la plus grande partie de l'année, mais ils peuvent générer des crues violentes et brèves, causées par des averses de pluie orageuses et intenses.

Le climat de la région d'étude est du type semi-aride à aride avec une nuance continentale. Il est continental dans les zones situées dans la région des haut-plateaux à une altitude moyenne de 700 mètres, avec une topographie globalement plate. Le climat est continental, froid et assez humide en hiver, très chaud et sec en été. La saison du printemps y est très courte. Le niveau des précipitations est très capricieux, si bien qu'il peut varier du simple au double d'une année à l'autre (240 mm). Il est semi-aride dans les zones situées dans les parties du Centre et du Nord de la Wilaya de Djelfa avec une moyenne de 200mm à 350 mm de pluie.

Le trace entre le Pk 142+000 au PK 155+000, est traversé par petit cours d'eau, appartenant à deux grands oued (Oued Bou Sedraia et Oued M'Barek).

### VIII.1.2. Données pluviométriques :

Les données de la région d'étude ont été recueillies auprès de l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH) et de l'Office National de la Météorologie (ONM). Il s'agit d'observations journalières reportées sur des tableaux de cumuls mensuels (TCM). A partir de ces données mensuelles nous avons reconstitué les valeurs de pluies annuelles.

#### Pluies annuelles :

Dans le tableau suivant nous présentons les pluies annuelles des stations disponibles dans la région pour différentes fréquences.

**Tableau VIII.2 : Pluviométrie annuelle en mm**

Période de retour- T(ans)	Fréquence	Ain Oussera (01 12 05)
<b>10</b>	0.90	361.57
<b>20</b>	0.95	400.41
<b>50</b>	0.98	449.13
<b>100</b>	0.99	484.86

#### Précipitations journalières :

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

Dans le tableau suivant nous présentons les pluies maximales journalières des stations de la région pour différentes fréquences.

**Tableau VIII.3 : Pluies maximales journalières (mm)**

Période de retour- T(ans)	Fréquence	Ain Oussera (01 12 05)
<b>10</b>	0.90	48.27
<b>20</b>	0.95	55.45
<b>50</b>	0.98	64.74
<b>100</b>	0.99	71.70

- Le code (01 12 05) c'est le code de station donné par ANRH.

**VIII.1.3. Caractéristiques des paramètres des bassins versants :**

La détermination des caractéristiques des bassins versants consiste à calculer, ou évaluer, les paramètres explicatifs, indispensables à l'évaluation des débits de crues. Les paramètres physiques peuvent être calculés, sans grandes difficultés, avec une précision satisfaisante.

Les caractéristiques des paramètres des bassins versants des oueds traversant notre tronçon sont données par le tableau récapitulatif suivant :

**Tableau VIII.4 : Les caractéristiques des bassins versants et cours d'eau [12].**

N°BV	Pk	Bassins Versants						Cours d'Eau Principal					
		S [km <sup>2</sup> ]	P [km]	Altitude [m]		Ks	Lr [km]	Im [m/Km]	L [km]	Altitude [m]		Ig (%)	Ig (m/km)
				Max	Min					Max	Min		
1	144+075	1.03	3.96	745	714	1.09	0.98	31.49	1.16	739	714	0.022	22.00
2	144+725	1.08	4.38	742	716	1.18	1.43	18.12	1.09	730	716	0.013	13.00
3	145+645	0.97	3.82	742	716	1.09	0.96	27.21	1.12	740	716	0.021	21.00
4	145+900	0.34	2.48	742	717	1.19	0.83	30.26	.62	735	717	0.029	29.00
5	146+750	0.36	2.46	740	728	1.15	0.75	15.93	0.43	735	728	0.016	16.00
6	147+575	0.7	3.61	735	720	1.21	1.24	12.08	0.67	724	720	0.006	6.00
7	147+925	0.88	4.07	736	721	1.21	1.39	10.77	1.37	729	721	0.006	6.00
8	148+525	1.52	5.41	748	725	1.23	1.91	12.06	1.93	38	725	0.007	7.00
9	150+475	1.04	4.19	761	732	1.15	1.28	22.65	1.14	750	732	0.016	16.00
10	151+975	1.98	5.85	761	742	1.16	1.83	10.38	1.95	761	742	0.01	10.00
11	153+400	0.1	2.01	761	753	1.78	0.89	8.99	0.23	760	753	0.03	30.00
12	153+800	0.14	1.57	761	755	1.17	0.50	11.95	0.20	759	755	0.02	20.00
13	154+650	0.13	1.93	757	755	1.50	0.8	2.50	0.13	756	755	0.008	8.00

**Avec :**

**S** : surface du bassin versant.

**P** : périmètre du bassin versant.

**K<sub>s</sub>** : Indice de compacité.

**L<sub>r</sub>** : Longueur du rectangle équivalent.

**L** : Longueur du cours d'eau.

**I<sub>g</sub>** : Indice de Pente Globale.

**I<sub>g</sub> (%)** : Indice de pente globale en %.

- La délimitation des contours des bassins versants des oueds étudiés est effectuée sur la base des cartes d'État Majeur à l'échelle 1 :50 000, voir **Annexe D**

**VIII.1.4. Détermination du débit de crue :**

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

**VIII.1.4.1 La méthode rationnelle :**

La méthode rationnelle permet de calculer le débit maximal associé à une certaine période de retour. Elle est applicable pour les bassins versants ayant une surface inférieure à 10 km<sup>2</sup>.

Le débit de pointe d'un bassin versant est calculé par la formule suivante [10] :

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

$Q_{max}$  : débit maximal de la crue (m<sup>3</sup>/s).

$C$  : Coefficient de ruissellement.

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

$A$  : la surface du bassin versant (km<sup>2</sup>).

**1.4.2. Coefficient de ruissellement :**

Le coefficient de ruissellement  $c$ 'est le rapport entre la précipitation utile et la précipitation totale ayant lieu dans un bassin, il varie par rapport à La couverture végétale, la forme, la pente et la nature du terrain. Sa valeur adoptée pour notre projet associé à la période de retour centennale est :  $C= 0.38$ .

**VIII.1.4.3. Intensité de la pluie :**

Le calcul de l'intensité de la pluie [ $I$ ], pour une certaine durée [ $t$ ] et période de retour [ $T$ ] est obtenu à partir de l'expression suivante :

$$I = at^b$$

Avec :

$I$  : étant l'intensité de la pluie [mm/h]

$t$  : la durée [min]

$a$  et  $b$  : les paramètres des courbes IDF.

**Tableau VIII.5 : Paramètres a et b des Courbes IDF pour la région de l'étude [12].**

T [ans]	Ain Oussera (01 12 05)	
	a	b
<b>10</b>	727.375	-0.81
<b>20</b>	835.526	-0.81
<b>50</b>	975.539	-0.81
<b>100</b>	1080.465	-0.81

**VIII.1.4.4. Le temps de concentration d'eau T<sub>c</sub> :**

Le calcul du temps de concentration a une grande influence sur l'évaluation des débits des crues, ce temps caractéristique d'un bassin versant dépend de l'étendue, de la forme et de la pente du bassin versant. Il est évalué à aide des formules usuelles acceptées par les autorités algériennes.

Pour le calcul des temps de concentration des bassins versants on a utilisé la formule de Ventura [11] :

$$T_c = 0.1272 \sqrt{\frac{A}{J}}$$

**Tel que**

T<sub>c</sub> [h] : temps de concentration.

A [km<sup>2</sup>] : surface du bassin versant.

J [m/m] : pente brute du bassin.

**VIII.1.5. Application au projet :**

Le bassin versant N° 1 :

A = 1.03 Km<sup>2</sup> < 10 km<sup>2</sup> on peut appliquer **la formule rationnelle** :

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

A = 1.03 Km<sup>2</sup>

C = 0.38

**Calcul temps de concentration d'eau T<sub>c</sub> :**

A = 1.03 km<sup>2</sup> < 5 km<sup>2</sup> on applique **la formule de Ventura**

$$T_c = 0.1272 \sqrt{\frac{A}{J}} = 0.1272 \sqrt{\frac{1.03}{0.022}} = 0.87 \text{ h} = 52.22 \text{ min}$$

**Intensité maximale des précipitations I :**

Pour (T = 100 ans) : a = 1080.465 et b = -0.81

$$I = 1080.465 \times 52.22^{-0.81} = 43.8 \text{ mm/h}$$

Donc:

$$Q_{max} = \frac{0.38 \times 43.87 \times 1.03}{3.6} = 4.77 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

Les débits de pointe de crue (de période 100 ans) pour les différents bassins versant sont présentés dans l'**Annex D**.

## VIII.2. L'étude hydraulique :

Le dimensionnement des ouvrages hydrauliques a eu pour objectif de ne pas rendre significativement plus graves les conditions de ruissellement par rapport aux conditions naturelles. Le drainage est classifié traditionnellement en deux types : drainage superficiel (fossés) et drainage Souterrain (les buses, ponceaux ou dalots).

### VIII.2.1. Le débit de saturation $Q_s$ :

Le débit de saturation est donné par la formule de **MANNING-STRICKLER** :

$$Q_s = V \times S_m$$

Tel que :  $V = K_{st} \times R_h^{2/3} \times I^{1/2}$

$Q_s$  : débit de saturation ( $m^3/s$ )

$V$  : vitesse d'écoulement d'eau ( $m/s$ ).

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

$K_{st}$  : coefficient de la formule de Manning-Strickler ( $m^{1/3}/s$ )

$R_h$  : rayon hydraulique ( $m$ )

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

$K_s$  est le coefficient de rugosité dépend de la nature des parois internes de l'ouvrage

### VIII.2.2. Le drainage transversal :

Le drainage transversal a pour objectif d'assurer le rétablissement des conditions de ruissellement des lignes d'eau naturelles interceptées par la construction de la voie. Les structures considérées pour le drainage transversal comprennent les dalots et les buses.

Le drainage transversal a été dimensionné pour un débit de pointe de crue correspondant à une période de retour de  $T = 100$  ans par la méthode de **MANNING-STRICKLER**

#### VIII.2.2.1. Dimensionnements des dalots :

Les dalots sont des Ouvrages de sections rectangulaires ou carrées, disposés sous le tracé, identifié par la largeur de ( $B$ ) et la hauteur ( $H$ ).

On fixe la hauteur d'après la configuration du profil en long et on calcule la travée nécessaire

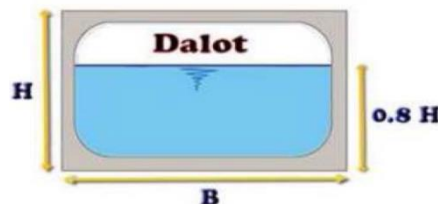
On fixe aussi la hauteur de remplissage à  $H_r = 0.8H$ .

Les dimensions du dalot

-  $B$  : largeur nette du cadre ( $m$ ).

-  $H$  : hauteur nette ( $m$ ).

-  $0.8H$  : hauteur de remplissage ( $m$ ).



On calcule par itération les dimensions du dalot en utilisant la formule Manning-Strickler :

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

Avec:

$$S_m = H_r \times B = 0.8H \times B \text{ surface mouillée (m}^2\text{)}$$

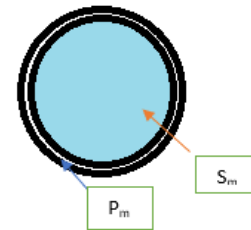
$$P_m = 2H_r + B = 1.6H + B \text{ périmètre mouillé (m)}$$

$$R_h = \frac{SM}{PM} = \frac{0.8h \times b}{1.6h + b} \text{ rayon hydraulique (m)}$$

Pour dimensionner les dalots on prend  $Q_{max} = Q_s$

$$Q_{max} = K_{st} \times R_h^{2/3} \times I^{1/2} \times S_m = K_{st} \times \left( \frac{0.8H \times B}{1.6H + B} \right)^{2/3} \times I^{1/2} \times 0.8H \times B$$

$$\frac{Q_{max}}{K_{st} \times I^{1/2}} = R_h^{2/3} \times S_m = \left( \frac{0.8H \times B}{1.6H + B} \right)^{2/3} \times (0.8H \times B)$$



**Application numérique :**

Tenant compte de BV N° 1 (PK 144 +075) :

$$I = 0.005$$

$$Q_{max} = 4.77$$

$$K_s = 70$$

La résolution de cette équation se fait par la méthode itérative, On propose un dalot carré avec une seule cellule :  $B = H$ .

$$\frac{Q_{max}}{K_{st} \times I^{1/2}} = \frac{4.77}{70 \times 0.005^{1/2}} = 0.96$$

**Tableau VIII.6 : Calcul des dimensions des dalots par itération.**

H	B	S <sub>m</sub>	P <sub>m</sub>	R <sub>h</sub>	R <sub>h</sub> <sup>2/3</sup> × S <sub>m</sub>
1	1	0.8	2.6	0.30	0.36
1.25	1.25	1.25	3.25	0.38	0.66
1.5	1.5	1.8	3.9	0.46	1.07

Après les calculs itératifs, les valeurs retenues pour section (dalot) sont :

$$H = 1.5 \text{ m}$$

$$B = 1.5 \text{ m}$$

$$Q_{ps} = K_{st} \times R_h^{2/3} \times I^{1/2} \times S_m = 70 \times 0.5^{2/3} \times 0.005^{1/2} \times 2.25 = 7.01 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Tableau VIII.7 : Dimensions d'ouvrage au PK 144+075**

N°BV	pk	Type de l'ouvrage	Q <sub>a</sub>	k <sub>s</sub>	i	h	b	sm	pm	rh	Q <sub>ps</sub>
01	144+075	Dalot	4.77	70	0.005	1.5	1.5	2.25	4.5	0.5	7.01

**Vérification les conditions d'auto curage :**

**1<sup>ere</sup> condition :**

$$V > 0.6 \text{ m/s pour : } Q = 0.1 \text{ Qps.}$$

$$\frac{Q_a}{Q_{ps}} = R_q = 0.1 \Rightarrow R_v = 0.638$$

$$V_{ps} = \frac{Q_{ps}}{sm} = \frac{7.01}{2.25} = 3.12 \text{ m/s et } V = V_{ps} \times R_v = 3.12 \times 0.638 = 1.99 \text{ m/s}$$

$$1.99 > 0.6 \text{ m/s} \Rightarrow \text{la condition est vérifiée.}$$

**2<sup>ere</sup> condition :**

$V > 0.30$  m/s pour :  $Q = 0.01$  Qps.

$$\frac{Qa}{Qps} = Rq = 0.01 \Rightarrow Rv = 0.315$$

$$Vps = \frac{Qps}{sm} = \frac{7.01}{2.25} = 3.12 \text{ m/s} \quad \text{et} \quad V = Vps \times Rv = 3.12 \times 0.315 = 0.98 \text{ m/s}$$

$0.98 > 0.30$  m/s  $\Rightarrow$  la condition est vérifiée.

**3<sup>ere</sup> condition :**

Le taux de remplissage en cas de débit d'apport  $r_h < 0.8$

$$rq = \frac{Qa}{Qps} = \frac{4.77}{7.01} = 0.680 \Rightarrow r_h = 0.606 < 0.8 \Rightarrow \text{la condition est vérifiée.}$$

**VIII.2.2.2. Dimensionnements des buses :**

Les buses sont des ouvrages de sections circulaires préfabriqués en béton armé de disposés sous le tracé sur les points bas du terrain, d'un diamètre de 1000 à 2000 mm

$$S_m = \pi R^2 \text{ (surface mouillée (m}^2\text{))}$$

$$P_m = 2\pi R \text{ (périmètre mouille(m))}$$

$$R_h = \frac{S_m}{P_m} = \frac{\pi R^2}{2\pi R} = \frac{D}{4} \text{ (rayon hydraulique (m))}$$

On a la formule de Manning-Strickler :

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

$$Q_{max} = Q_s = k_{st} \times \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \times I^{1/2} \times \frac{1}{4}\pi(D)^2 \Rightarrow Q_a = k_{st} \times I^{1/2} \times \pi \times \left(\frac{1}{4}\right)^{5/3} \times (D)^{8/3}$$

Donc :

$$D = \left(\frac{Q_{max} \times (4)^{5/3}}{k_{st} \times (I)^{1/2} \times \pi}\right)^{3/8}$$

**Application numérique :**

Tenant compte de BV N°4 (PK 145 +900) :

$$I = 0.01$$

$$Q_{max} = 2.76$$

$K_s = 80$  bétons (buses préfabriqués)

$$D = \left(\frac{Q_{max} \times (4)^{5/3}}{k_{st} \times (I)^{1/2} \times \pi}\right)^{3/8} = \left(\frac{2.76 \times (4)^{5/3}}{80 \times (0.01)^{1/2} \times \pi}\right)^{3/8} = 1.03 \text{ m}$$

On prend un diamètre de 1.2 m donc une buse de  $\phi 1200$  mm pour des raisons de sécurité.

**Tableau VIII.8 : Dimensions d'ouvrage au PK 145+900**

N°BV	Pk	Ouvrages Prévus	qa	ks	I	Dcalculé	D	Sm	Qps	Vps
4	145+900	Buse	2.76	80	0,005	1,04	1,2	1,13	7.35	6.50

D'autres résultats de calculs d'hydraulique et d'assainissement sont présentés dans les tableaux d'Annexe D

**Vérification les conditions d'auto curage :****1<sup>ère</sup> condition :**

$V > 0.6$  m/s pour :  $Q = 0.1$  Qps.

$$\frac{qa}{qps} = Rq = 0.1 \Rightarrow Rv = 0.638$$

$$V_{ps} = \frac{qps}{sm} = \frac{7.35}{1.13} = 6.50 \text{ m/s} \quad \text{et} \quad V = V_{ps} \times Rv = 6.50 \times 0.638 = 4.14 \text{ m/s}$$

$4.14 > 0.6$  m/s  $\Rightarrow$  la condition est vérifiée.

**2<sup>ème</sup> condition :**

$V > 0.30$  m/s pour :  $Q = 0.01$  Qps.

$$\frac{qa}{qps} = Rq = 0.01 \Rightarrow Rv = 0.315$$

$$V_{ps} = \frac{qps}{sm} = \frac{7.35}{1.13} = 6.50 \text{ m/s} \quad \text{et} \quad V = V_{ps} \times Rv = 6.50 \times 0.315 = 2.04 \text{ m/s}$$

$2.04 > 0.30$  m/s  $\Rightarrow$  la condition est vérifiée.

**3<sup>ème</sup> condition :**

Le taux de remplissage en cas de débit d'apport  $R_h < 0.8$

$$rq = \frac{qa}{qps} = \frac{4.05}{7.35} = 0.680 \Rightarrow rh = 0.551 < 0.8 \Rightarrow \text{la condition est vérifiée.}$$

**VIII.2.3. Drainage longitudinal :**

Le drainage longitudinal permet la captation et l'acheminement des eaux qui accèdent à la plateforme de la voie ferrée, venant soit des écoulements des talus soit des pentes adjacentes. Ce drainage sera formé par fossés et caniveaux qui conduiront les eaux aux ouvrages hydrauliques ou directement aux lignes d'eau existantes.

**VIII.2.3.1. Dimensionnement des fossés :**

Pour le calcul hydraulique des fossés a été utilisée la formule de Manning-Strickler :

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

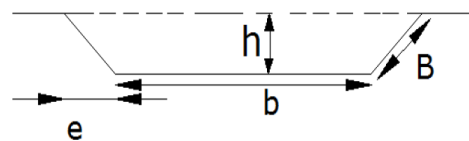
On choisit des fossés de forme trapézoïdale en béton, ont donné un schéma d'un fossé trapézoïdale suivant :

$$S_m = (b+z.h).h \text{ (surface mouillée (m}^2\text{))}$$

$$P_m = b+2h.\sqrt{1+z^2} \text{ (périmètre mouillé(m))}$$

$$R_h = \frac{S_m}{P_m} = \text{(rayon hydraulique (m))}$$

Z : la pente des berges.



Les dimensions du fossé sont obtenues, en écrivant l'égalité du débit d'apport et le débit de saturation  $Q_s = Q_{\text{apport}}$ .

$$Q_s = Q_{\text{apport}} = K_{st} \times R_h^{2/3} \times I^{1/2} \times S_m = K_{st} \times \left(\frac{S_m}{P_m}\right)^{2/3} \times I^{1/2} \times (b+z.h).h$$

$$\frac{Q_a}{K_s \times I^{1/2}} = \left(\frac{(b+z.h).h}{b+2h.\sqrt{1+z^2}}\right)^{2/3} \times (b+z.h).h$$

**-Estimation du débit d'apport :**

Pour le dimensionnement des fossés, le débit d'apport se divise en plusieurs débits apportés par la plateforme, les talus, les bermes

**Application numérique :****Tableau VIII.9 : Calcul des débits à évacuer dans le cas de remblai et de déblai**

		Cas remblai	Cas déblai
		Le cas plus défavorable : Longueur = 3800 H <sub>talus</sub> = 8.12 Berme = 0.7 Largeur de la plateforme =6.8	Le cas plus défavorable : Longueur = 925m H <sub>talus</sub> = 6 Berme = 0.7 Largeur de la plateforme =6.8
<b>Plateforme</b>	Cr	0.7	0.7
	P(m/m)	0.04	0.04
	A(Km <sup>2</sup> )	0.02584	0.00629
	Tc(h)	0.102236	0.050441
	I (mm/h)	248.616	440.610
	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	1.249	0.539
<b>Les bermes</b>	Cr	0.5	0.5
	P(m/m)	0.04	0.04
	A(Km <sup>2</sup> )	0.00266	0.000647
	Tc(h)	0.032801	0.016183
	I (mm/h)	624.354	1106.511
	Q <sub>b</sub> (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.0994
<b>Les talus</b>	Cr	0.5	0.5
	P(m/m)	0.5	0.67
	A(Km <sup>2</sup> )	0.068996	0.010005
	Tc(h)	0.16705	0.063617
	I (mm/h)	167.026	365.100
	Q <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> /s)	1.600	0.507
<b>Q<sub>a</sub> (m<sup>3</sup>/s) (totale)</b>		Q <sub>pf</sub> + Q <sub>b</sub> + Q <sub>t</sub> = 3.079	Q <sub>pf</sub> + Q <sub>b</sub> + Q <sub>t</sub> =1.145

K<sub>s</sub> = 65 (revêtement en béton).

i = 0.02 (m/m).

$$\frac{Q_a}{K_s \times I^{1/2}} = \frac{3.079}{65 \times 0.02^{1/2}} = \left( \frac{(b+z.h).h}{b+2h.\sqrt{1+z^2}} \right)^{2/3} \times (b+z.h).h$$

$$\left( \frac{(0.5+1.5h).h}{0.5+2h.\sqrt{1+1.5^2}} \right)^{2/3} \times (0.5+1.5h).h = 0.340$$

On prend **b=0.50 m** et après les itérations on trouve :

h = 0.58 m on prend **h = 0.60 m** pour des raisons de sécurité.

**Chapitre IX**  
**Signalisation et**  
**Electrification**

## IX.1. Introduction :

Pour protéger la circulation des trains il faut un système d'information pour guider les conducteurs, ce système est un ensemble des signaux de forme, de combinaisons, ou de couleur diverse, disposés le long des voies. Les signaux transmettent des informations ou des ordres, et ceux-ci doivent toujours être pris en compte (limitation de vitesse à respecter, un arrêt non prévu à la marche à exécuter, l'information d'une direction géographique vers laquelle le convoi va s'engager...).

## IX.2. Les Objectifs de la signalisation :

Résumons la réflexion à quelques points primordiaux :

- Espacer la circulation des trains qui sont à la suite les uns des autres
- Eviter les trains à contre sens
- Garantir la protection des trains dans les gares (croisements, manœuvres)
- Eviter les déraillements pour vitesse excessive (sur les aiguillages)

## IX.3. Les blocks :

Les différents systèmes utilisés pour gérer les signaux sont appelés "blocks", et selon la catégorie de ligne on utilisera l'un des trois types de blocks ci-dessous :

- Le block manuel (B.M.).
- Le block automatique à permissivité restreinte (B.A.P.R.).
- Le block automatique lumineux (B.A.L.).

• **Le block manuel** est utilisé sur des lignes peu fréquentées, dont l'exploitation est assurée totalement manuellement. Le nombre de signaux implantés sur les voies est très réduit, les installations de commande sont simples, ce qui en fait un système économique. Cependant ce type de block ne permet pas un gros débit sur les lignes et n'est donc utilisé que sur des lignes secondaires peu fréquentées.

• **Le block automatique à permissivité restreinte** est utilisé sur des lignes secondaires. C'est un système automatique, mais la longueur des cantons est relativement importante (plusieurs kilomètres). Ce système présente l'avantage d'une sécurité accrue par rapport au block manuel (le risque d'erreur humaine est diminué), tout en restant économique car le nombre de signaux implantés reste faible. De par son fonctionnement ce type de block ne permet pas des débits élevés sur une ligne. En effet le franchissement des signaux d'espacements fermés est interdit, pour éviter des marches à vue trop longues (puisque les cantons sont grands !), d'où son nom de "permissivité restreinte".

• **Le block automatique lumineux** est utilisé sur les lignes principales. Ce système est automatique et permet un débit maximal sur une ligne, d'autre part il autorise également un espacement réduit des circulations puisque le franchissement des signaux d'espacements fermés en marche à vue est autorisé (c'est un système "permissif"). C'est le système le plus souple pour régler les circulations, mais c'est aussi le plus onéreux (installation de nombreux signaux et postes de commande complexes).

## IX.4. Les types de signalisation :

### IX.4.1. La signalisation lumineuse :

Pour réaliser la signalisation lumineuse, on utilise des panneaux portants un ou plusieurs feux. Ces panneaux sont constitués d'un écran noir bordé d'un liséré blanc. Il existe différentes formes de panneaux qui varient selon le nombre et le type des indications devant être présentées.

**Sur Mats :****Et au sol :**

Les signaux lumineux utilisent des couleurs suffisamment différenciées pour ne pas être confondus par les mécaniciens. Ces couleurs sont le vert, le jaune, le rouge, le blanc, le violet.



Notez que les signaux sont toujours implantés à gauche de la voie (ou sur des potences, dans ce cas le conducteur voit le signal devant lui mais en hauteur), quelques cas prévoient une implantation à droite.

**IX.4.2. La signalisation mécanique :**

Le signal est réalisé au moyen d'une aile, d'une cocarde de couleur ou d'un tableau mécanique.

- La visibilité des cocardes est parfois difficile,
- Aussi permettre leur observation de nuit ou par mauvaise visibilité, ces signaux présentent généralement un ou plusieurs feux,
- La signalisation mécanique est simple, peu coûteuse et facile d'emploi,
- Cependant, la commande des signaux est lourde et fragile et certaines avaries de fonctionnement sont à craindre.



**IX.4.3. Autres types de signalisation :**

- Signaux à main/mobiles (lampes, drapeaux) ;
  - Signaux acoustiques (pétards, coups de klaxon, bips radio).
  - Les pancartes et les panneaux de signalisation
- Le classement de la signalisation se fait de la manière suivante en partant du niveau le plus haut de sécurité
- Les signaux d'arrêt non franchissable
  - Les signaux d'arrêt
  - Les signaux de manœuvre
  - Les signaux de rappel
  - L'avertissement
  - Les signaux de ralentissement
  - Le pré-avertissement
  - La voie libre



**Et dans le cas de notre projet :** il est recommandé d'utiliser le système de signalisation ERTMS niveau 2 qui est une solution digitale qui permet aux trains de circuler à des vitesses élevées sans signalisation latérale.

## IX.4.3.1. Les signaux d'arrêt Non franchissable

-Le carré :



Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
		Il est constitué de deux feux rouges fixes. Le mécanicien doit s'arrêter devant le signal. Celui-ci ne peut pas être franchi fermer. Ce signal est utilisé sur les voies principales il protège aiguillages, gares, quelquefois il sert à assurer l'espacement des trains, mais il n'est pas franchissable.	Ce signal peut aussi se présenter horizontalement

-Le carré violet :


Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
		Constitué d'une lampe violette fixe, il est en tout point similaire au carré mais on le rencontre sur les voies de manœuvre. Celui-ci ne peut pas être franchi fermer.	Ce signal peut aussi se présenter horizontalement

## IX.4.3.2. Les signaux d'arrêt :



-Le sémaphore :

Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
		Constitué d'un feu rouge fixe, il commande au mécanicien de s'arrêter devant le signal. C'est un signal d'espacement des trains. Rappelez-vous (voir plus haut) ce dernier en B.A.L peut être franchi (après arrêt) en marche à vue jusqu'à la fin du canton suivant. En B.A.P.R il ne peut pas être franchi.	En signalisation mécanique l'aile rouge pivote, s'incline vers la droite. Le signal ouvert est donc présenté entre la position horizontale et verticale.

- Le feu rouge clignotant :



Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
	N.A	Constitué d'un feu rouge clignotant, c'est un sémaphore (voir ci-dessus) dont l'arrêt n'est pas obligatoire. Le mécanicien peut alors le franchir en marche à vue à la vitesse de 15 Km/H	Ce signal est particulièrement utilisé dans les rampes pour éviter aux trains lourds de s'arrêter (trains calés) et aussi dans les gares de passage ou la dite circulation ne doit pas s'arrêter..

-Le disque :



Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
		Constitué d'un feu rouge et d'un feu jaune (fixes) disposés horizontalement sur une cible ronde, il commande au mécanicien de passer en marche à vue mais l'oblige à marquer l'arrêt au premier signal ou aiguillage rencontré.	Ce signal n'est pas implanté en B.A.L. il n'est rencontré que sur les lignes peu fréquentées.

IX.4.3.3. Les signaux de manœuvre :

-Le feu blanc clignotant :





Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
	N. A	Constitué d'un feu blanc clignotant, il autorise l'exécution d'une manœuvre sur une voie de courte section. Une présentation horizontale de ce signal est possible --->	Le départ en ligne est interdit. 

-Le feu blanc :




Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
	La plaque violette du carré violet est tournée sur le côté, donc V.L	Constitué d'un feu blanc fixe, il autorise la marche en manœuvre. Ce signal est l'opposition du carré violet (feu violet allumé) voir ci-dessus. Une présentation horizontale de ce signal est possible --->	Le départ en ligne classique en respectant la marche à vue jusqu'au prochain signal (sans dépasser 30 Km/h sur les aiguillages) est possible. 

**IX.4.3.4. Les signaux de rappel :**

**-Le rappel de ralentissement 30 et 60 :**





Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
	N.A	Constitué de deux feux jaunes clignotants présentés verticalement, il confirme au mécanicien de ralentir à 60 Km/h pour franchir des aiguillages.	Ce signal peut être combiné avec d'autres signaux, par exemple un avertissement
		Constitué de deux feux jaunes fixes présentés verticalement, il confirme au mécanicien de ralentir à 30 km/h pour franchir des aiguillages. La présentation de ce signal peut aussi se faire sur une cible noire ronde --->	

**IX.4.3.5. L'avertissement :**


Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
		Constitué d'un feu jaune fixe, il commande au mécanicien d'être en mesure de pouvoir s'arrêter avant le signal suivant : carré, sémaphore, carré violet, ou feu rouge clignotant, ou tout simplement un panneau éteint.	La présentation de ce signal peut aussi se faire sur une cible noire ronde. 

**IX.4.3.5. Les signaux de ralentissement :**



**-Le ralentissement 60 et 30 :**

Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
		Constitué de deux feux jaunes fixes présentés horizontalement, il commande au mécanicien de ralentir à 30 Km/H pour franchir des aiguillages. La présentation de ce signal peut aussi se faire sur une cible noire ronde --->	
	N. A	Constitué de deux feux jaunes clignotants présentés horizontalement, il commande au mécanicien de ralentir à 60 Km/H pour franchir des aiguillages.	Ce signal peut être combiné avec d'autres signaux, par exemple un avertissement

IX.4.3.6. Le pré-avertissement :


Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
	N. A	Constitué d'un feu jaune clignotant, il commande au mécanicien d'être en mesure de pouvoir s'arrêter avant le signal annoncé à distance réduite par l'avertissement.	. Ce signal est utilisé lorsque le canton est très court, il permet au train de s'arrêter en toute sécurité.

IX.4.3.7. La voie libre :


Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
	Toutes les plaques des signaux sont tournées sur le coté	Constitué d'un feu vert fixe, il indique au mécanicien que la voie est libre, et que la marche normale est autorisée (si rien ne s'y oppose).	La présentation de ce signal peut aussi se faire sur une cible noire ronde
	N. A	Constitué d'un feu vert clignotant, ce signal commande au mécanicien de ramener sa vitesse à 160 Km/h au signal suivant. Il peut annoncer un autre feu vert clignotant également.	Ce signal n'est bien sur implanté que sur les lignes dont la vitesse est supérieure à 160 Km/h (lignes à 200 Km/h)

IX.4.3.8. D'autres signaux :




-L'indicateur de direction :

Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
	N.A	Constitué de lampes blanches fixes (au minimum deux), ce signal indique au mécanicien la direction (donc en cas de bifurcations) vers laquelle est dirigée son train. Le nombre de feux dépend du nombre d'itinéraires pouvant être empruntés depuis ce signal. Le nombre de feux allumés correspond au numéro d'ordre, à partir de la gauche de la direction prévue.	Ce signal peut être implanté seul, avant la bifurcation bien sûr, mais il peut aussi être placé au-dessus du signal de protection (carré). Une lampe allumée : c'est sur la voie de gauche ou le train sera dirigé. Les trois lampes allumées, le train ira sur la voie de droite








**-Le Guidon d'arrêt :**

Signal Lumineux	Signal Mécanique	Application	Observations
	N.A	Il se présente sous la forme d'une bande horizontale lumineuse fixe de couleur rouge. Il commande au mécanicien de s'arrêter devant le signal. Ce signal n'est pas présenté sur une cible noire	Ce signal est utilisé pour protéger un passage à niveau (ou la pédale de déclenchement de celui-ci)








**IX.5. Les plaques d'identification sur les signaux :****-Des plaques de repérage (numéro de signal) :**

	Plaque de repérage du carré violet numéro 530.
	Plaque de repérage du carré 1204.
	Plaque de repérage pour un signal placé au kilomètre 203,8 de la ligne.

**-Des plaques d'identification :**

	Plaque d'identification d'un carré (ou d'un carré violet).
	Plaque d'identification d'un sémaphore de B.A.L.
	Plaque d'identification d'un sémaphore de B.A.P.R.
	Plaque d'identification d'un sémaphore de B.M
	Plaque d'identification d'un disque.
	Plaque d'identification d'un avertissement
	Plaque d'identification d'un guidon d'arrêt.

## IX.6. Exemple des pancartes et les panneaux de signalisation :

 <i>Pancarte kilométrique.</i>	La pancarte kilométrique permet de repérer sur une ligne les points de transition de vitesse limite
 <i>Pancarte Z.</i>	Cette pancarte repère lorsque cela est nécessaire le début d'une zone à franchir à vitesse limitée
 <i>Pancarte R.</i>	Cette pancarte marque la fin d'une zone à vitesse limitée, et autorise le mécanicien à reprendre une vitesse normale
 <i>Panneau pentagonal à distance.</i>	Ce panneau annonce la vitesse à ne pas dépasser, il est implanté à distance suffisamment loin pour permettre le ralentissement du train avant le passage au point où la vitesse est limitée.
	Le jalon à damier bleu et blanc est utilisé dans les triages et sur les voies de service. Il a la même signification que le jalon à damier rouge et blanc à la différence qu'il ne s'adresse qu'aux mouvements électriques. Il commande l'arrêt des circulations en marche à vue ou en manoeuvre.
 <i>Pancarte Heurtoir.</i>	Cette pancarte indique au mécanicien que son train est dirigé vers une voie en impasse dont le heurtoir est situé à la distance indiquée
 <i>Panneau à distance de chantier</i>	Ce panneau commande au mécanicien de ralentir à la vitesse indiquée avant le chantier annoncé

**Chapitre X**  
**Devis quantitatif et**  
**estimatif**

**X. Devis quantitatif et estimatif**

Désignation	Unité	Prix unitaire (DA)	Quantité	Montant (DA)
<b>Installation générale du chantier</b>				
Installation générale du chantier	F	30 000 000	1	30 000 000
<b>Total</b>				<b>30 000 000</b>
<b>Terrassement</b>				
Décapage de terre végétale	M <sup>3</sup>	455.95	84 108.183	38 349 126.04
Déblais mis en remblai	M <sup>3</sup>	794.20	291 840.839	231 779 994.3
Déblais mis en dépôt	M <sup>3</sup>	486.18	24 347.88	11 837 452.3
Remblais d'emprunt	M <sup>3</sup>	690	27 243.041	18 797 698.29
<b>Total</b>				<b>300 764 270.93</b>
<b>Couches d'assises</b>				
Sous ballast	M <sup>3</sup>	778.32	27 383.840	21 313 390.35
Couche de fondation	M <sup>3</sup>	3 341.80	25 549.030	85 359 697.65
Couche de forme	M <sup>3</sup>	3 341.80	42 220.667	141 093 025
<b>Total</b>				<b>247 766 113</b>
<b>Travaux de la voie</b>				
Ballastage	M <sup>3</sup>	3850	31 250.72	120 315 272
Fourniture rail UIC60	T	107 300	1 560	167 388 000
Fourniture des attachés NABLA	U	523.80	43 334	226 368 149.2
Pose de la voie	M	5 318.13	26 000	138 271 380
Fourniture des traverses monobloc	U	7 000	21 667	15 669 000
Soudure aluminothermique	U	18915	91	1 721 265
Soudure électrique	U	17 430.61	1 445	25 187 231.45
<b>Totale</b>				<b>694 920 297.7</b>
<b>Assainissement généraux</b>				
Fossés trapézoïdaux en béton armé (0.6×0.5)	ml	5000	5 050	25 250 000
Dalot en béton armé (2×2)	U	2 800 000	1	2 800 000
Dalot en béton armé (1.5×1.5)	U	2 500 000	3	7 500 000
Buse en béton armé Ø1.50	U	156 800	1	156 800
Buse en béton armé Ø1.20	U	153 000	5	765 000
Buse en béton armé Ø1.00	U	150 000	3	450 000
<b>Totale</b>				<b>36 921 800</b>

Les Ouvrages d'Art				
Passage Inférieure faune Au PK 144+400	U	1	5 475 236.00	5 475 236.00
Passages Supérieur Au PK 149+012	U	1	46 470 296.50	46 470 296.50
Passages Inferieur Au PK 152+127	U	1	30 408 803.00	30 408 803.00
<b>Totale</b>				<b>82 354 335.5</b>
<b>Totale</b>			<b>1 392 726 817</b>	

<b>TOTAL HORS TAXES (H.T)</b>	<b>1 392 726 817</b>
TVA (19 %)	264 618 095.2
<b>TOTAL EN TTC</b>	<b>1 657 344 912</b>
<b>LE COUT TOTAL (DA)</b>	<b>1 657 344 912</b>

Le cout total de projet est de :

**Un milliard six cent cinquante-sept millions trois cent quarante-  
quatre mille neuf cent douze Dinar Algérien**

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

Le développement des infrastructures de transport est la base de toute politique d'aménagement du territoire. En effet, le programme de la relance économique accorde une importance capitale au domaine des travaux publics en œuvrant vers l'amélioration de l'aménagement des infrastructures de qualité dont le but primordial est d'offrir une qualité de services irréprochable aux utilisateurs des autoroutes et de la voie ferrée. L'intérêt porté à cette dernière et son développement permettra de gérer les problèmes du trafic qui s'aggrave de jour en jour en Algérie.

L'un des projets ferroviaires est celui que nous avons traité dans ce mémoire, en réalisant une étude d'avant-projet détaillé de la ligne ferroviaire qui relie la ville de Boughezoul à la ville de Djelfa du PK.142+000 au PK.155+000, en passant par les différentes étapes d'études géométrique, géotechnique, et d'assainissement, jusqu'à le dimensionnement des couches d'assise, et la conception de la superstructure, avec respect de toutes les normes UIC et les recommandations Algériennes de la SNTF, sans négliger l'aspect de sécurité et de confort des utilisateurs et des employés.

La réalisation de ce travail nous a permis de mieux maîtriser les logiciels CIVIL 3D, AUTOCAD et SLIDE, et aussi de bien maîtriser les différents problèmes qu'on a rencontré le long de tracé surtout les problèmes géotechniques et hydrauliques.

Finalement, Ce projet de voie ferrée nous a permis non seulement d'exprimer et d'appliquer nos connaissances acquises durant les cinq années de notre formation, mais aussi de mieux appréhender notre avenir dans le monde professionnel des infrastructures ferroviaires.

## **Bibliographie**

[1] Site L'Agence Nationale d'Etudes et de Suivi de la Réalisation des Investissements Ferroviaire (ANESRIF). <http://www.anesrif.dz/>

[2] Norme Française IN-0272, Conception du tracé de la voie  $\leq 220$  km/h.

[3] ALIAS, J. (1984). La voie verrée. Paris

[4] Mémoire de doctorat de Nathalie Guerin sur Approche expérimentale et numérique du comportement du ballast des voies ferrées

[5] Code UIC 703 (Union International Des Chemin De Fer).

[6] SNTF, Référentiel technique, version 02, chapitre 6 : Géométrie de la voie, 22/12/2005.

[7] Rapport géologique et géotechnique sur le tracé APD de la nouvelle ligne BOUMEDFAA – DJELFA (280 KM), tronçon Boughezoul-Djelfa- SNTF, Novembre 2012.

[8] RPOA 2008.

[9] UIC719 R, Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaire, 2e Edition, 01/01/1994.

[10] Guide technique Assainissement routiers Sétra Octobre 2006.

[11] Cours hydraulique appliqué, Rahmani, ENSTP 2016 chapitre 1,2 et 3.

[12] Rapport Hydrologique sur le tracé APD de la nouvelle ligne BOUMEDFAA – DJELFA (280 KM), tronçon Boughezoul-Djelfa- SNTF, Novembre 2012.

Mémoires projet de fin d'étude voie ferrée de l'ENSTP.

## **Webographie**

[www.google.com](http://www.google.com)

# Liste des Annexes

## Annexe A.1 : Listing de la géométrie de l'axe en plan

Client : ENSTP

Préparer par : BENREKHA et HEDIMI

Date : 10/09/2020 14 :58 :52

Axe en plan : axe 1

Plage d'abscisse : Début : 140+575.00, Fin : 155+000.76

Elem	Caractéristiques	Longueur	Abscisse	X	Y
			140+575.00	495351.8731	3920621.9953
DR1	ANG=149.1937 (g)	716.431			
			141+291.43	495864.8413	3920121.8584
CLO2	A=612.372				
	R=2500.000	150.000			
			141+441.43	495971.1853	3920016.0797
ARC3	XC=494173.0406				
	YC=3918279.2217				
	R=2500.000	1005.671			
			142+447.10	496507.6404	3919173.4498
CLO4	A=612.372				
	R=2500.000	150.000			
			142+597.10	496558.4800	3919032.3344
DR5	ANG=178.6227 (g)	1628.614			
			144+225.72	497095.1397	3917494.6805
CLO6	A=612.372				
	R=2500.000	150.000			
			144+375.72	497143.1470	3917352.5766
ARC7	XC=494759.1267				
	YC=3916599.9496				
	R=2500.000	1809.153			
			146+184.87	497044.0186	3915585.4205
CLO8	A=612.372				
	R=2500.000	150.000			
			146+334.87	496980.4199	3915449.5772
DR9	ANG=228.5121 (g)	1493.989			
			147+828.86	496333.4575	3914102.9360
CLO10	A=612.372				
	R=2500.000	150.000			
			147+978.86	496269.8588	3913967.0927

ARC11	XC=498554.7506				
	YC=3912952.5636				
	R=2500.000	1544.389			
			149+523.25	496104.5291	3912456.1621
CLO12	A=612.372				
	R=2500.000	150.000			
			149+673.25	496137.2460	3912309.7797
DR13	ANG=185.3648 (g)	3977.695			
			153+650.94	497043.6413	3908436.7313
CLO14	A=632.456				
	R=5000.000	80.000			
			153+730.94	497062.0784	3908358.8851
ARC15	XC=501921.2664				
	YC=3909537.1433				
	R=5000.000	565.094			
			154+296.04	497225.9614	3907818.3906
CLO16	A=632.456				
	R=5000.000	80.000			
			154+376.04	497253.8616	3907743.4137
DR17	ANG=177.1512 (g)	624.720			
			155+000.76	497473.2959	3907158.4998

## Annexe A.2 : Listing de la géométrie de profil en long.

Client : ENSTP

Préparer par : BENREKHA et HEDIMI

Date : 10/09/2020 15 :10 :54

Profil en long : Profil 1


Plage d'abscisse : Début: 140+575.00, Fin: 155+000.76

LONGUEUR DE L'AXE : 14425.760m

Elément	Caractéristiques des éléments	Longueur	Abscisse	Z
			140+575.00	706.158
D1	PENTE= 0.86%	1623.093		
			142+198.09	720.152
ARC1	S= 142+246.49 Z=720.569			
	R= -18000.000	96.786		
			142+294.88	721.247
D2	PENTE= 1.40%	499.343		
			142+794.22	728.237
ARC2	S= 142+994.08 Z=731.035			
	R= -25000.000	399.732		
			143+193.95	730.637
D3	PENTE= -0.20%	315.161		
			143+509.11	730.010
ARC3	S= 143+589.20 Z=729.851			
	R= -20000.000	160.177		
			143+669.29	729.050
D4	PENTE= -1.00%	874.110		
			144+543.40	720.309
ARC4	S= 144+696.39 Z=718.779			
	R= -18000.000	305.988		
			144+849.39	719.850
D5	PENTE= 0.70%	804.983		
			145+654.37	725.485
ARC5	S= 145+726.26 Z=725.988			
	R= -18000.000	143.781		
			145+798.15	725.917
D6	PENTE= -0.10%	1002.696		
			146+800.85	724.926
D7	PENTE= -0.05%	782.474		
			147+583.32	724.540

ARC7	S= 147+637.92 Z=724.513			
	R= -30000.000	109.190		
			147+692.51	724.685
D8	PENTE= 0.31%	1265.052		
			148+957.56	728.665
ARC8	S= 149+012.05 Z=728.837			
	R= -50000.000	108.981		
			149+066.54	729.127
D9	PENTE= 0.53%	754.225		
			149+820.77	733.144
D10	PENTE= 0.41%	1209.508		
			151+030.28	738.089
ARC10	S= 151+095.48 Z=738.356			
	R= -18000.000	130.403		
			151+160.68	739.095
D11	PENTE= 1.13%	1694.870		
			152+855.55	758.304
ARC11	S= 152+957.55 Z=759.460			
	R= -18000.000	203.996		
			153+059.55	759.460
D12	PENTE= -0.00%	734.554		
			153+794.10	759.460
ARC12	S= 153+850.76 Z=759.460			
	R= -25000.000	113.309		
			153+907.41	759.717
D13	PENTE= 0.45%	1093.346		
			155+000.76	764.673

Annexe B.1 : Puits de reconnaissance PK 143+450

	PROJET : Etude APD et DCE de la ligne électrifiée Boumedfaa / Djelfa	ENTREPRISE RÉALISANT LE PUITS : INZAMAC ALGERIE	TEMPS D'OUVERTURE DU PUITS (h) : 1h	PUIITS N°: P 119
	REFERENCE : GES/110001/AG-AG	EQUIPEMENT D'EXCAVATION : Pelle mécanique	TAILLE DU PUITS: (long×larg×prof) (m) : 3'0,7'0,4	
	SITUATION DU PUITS (P.K.): 143+250	LONGUEUR DU BRAS (m) : 6m	NOM DU GÉOLOGUE : MENAOU MLOUOD	
DISTANCE À L'AXE DU TRACÉ (INDIQUER DROITE OU GAUCHE) : ..... m	DATE DE LA RÉALISATION DU PUITS : 23/02/2011			
COORDONNÉES (X,Y,Z) : - X = 496 511,6156 - Y = 3 918 124,9416 - Z =				

Profondeur (m)	Profondeur du toit de la couche (m)	Épaisseur couche (m)	Orientation des		Description lithologique (1a)	Profondeur du niveau phréatique (m) (8a)	Présence de restes anthropiques (8a)	Type d'échantillon (EI, ER) (1c)	Degré de cimentation (7a)	Résistance à l'excauation (6a)	Degré de stabilité des parois (5a)	Filtrations (4a)	Essai réalisé "in situ" (3a)	Consistance des argiles (SRM, 1981) (2a)	Compacité, densité relative des sables (2b)
			Direction de pendage (°)	Pendage (°)											
0.00	0.1				Terre végétale										
0.3					Tuf + roche jaune + blanchâtre			ER	M	H	S	S			TD
0.50					Dalle de calcaire très dure, Impossible de creuser avec une pelle mécanique										
1.00															
1.50															
2.00															
2.50															
3.00															
3.50															
4.00															
4.50															
5.00															

Photo N° 01 :




Photo N° 02 :





Photo N° 03 :




**Légende:**

(1a) Inclure description de la granulométrie, degré d'altération, couleur, restes organiques et anthropiques.	Densité Densité relative (%)	(2b) Compacité, densité relative des sables (González de Vallejo y otros 2002).	(3a) Essais réalisés In Situ	(6a) : Résistance à l'excauation	(7a) : Degré de cimentation
(1c) Type d'échantillon recueilli: (EI) = échantillon intact, ER = échantillon remanié	L : Lâche 0-50 Une barre en acier de 12,5 mm de Ø pénètre facilement à la main.	F : Ferme 50-70 La barre en acier pénètre facilement avec un marteau de 2,3 Kg.	Pénétrétre de poche en Kg/Cm <sup>2</sup>	B : Basse M : Moyenne N: Nul B: Bas	N: Nul B: Bas
(2a) Consistance des argiles (SRM, 1981).	D : Dense 70-90 La barre en acier pénètre 30 cm avec le marteau.	Td Très den 90-100 La barre en acier pénètre seulement de quelques cm avec le marteau.	(4a) : Filtrations	H : Haute TH: Très Haute M: Moyen H: Haut	(5a) : Degré de stabilité des parois
S1 (Très moie) : Le poing pénètre facilement plusieurs cm.	S3 (Ferme) : Il faut une légère pression pour enfoncer le doigt.	S4 (Rigide) : Il faut une pression forte pour enfoncer le doigt.	S : Sec LH : légèrement Humide H : humide	G : Gouttant E : Ecoulement d'eau	S: Stable CM: Chute de matériau CB: Chute de blocs
S2 (Fable) : Le doigt pénètre facilement plusieurs cm.	S5 (Très rigide) : Avec un certain pression on marque avec l'ongle.	S6 (Dure) : On marque avec difficulté avec l'ongle.			D: déchaussement RC: Rupture circulaire E: Escoulement

## Annexe B.2 : Sondages carottés PK 143+030

		COUPE DE SONDAGE				Référence du dossier GIS 11 0001 AG AG Page N° 01 /01			
CLIENT: <i>groupement Systra - Getinsa - Setirail</i>		DATE DE REALISATION : 21/02/2011							
PROJET: <i>Etude APD et DCE de la ligne nouvelle Electrifiée Boumedfaa / Djelfa 266 km) du tronçon II Boughezoul / Djelfa PK 123 au PK 240, Lot - 1, coté Boughezoul.</i>		SONDAGE N° : <i>Sc 107</i>							
PROFOND. (m)	COUCHE GEOLOGIQUE	DESCRIPTION DE LA COUCHE	ESSAI			ECHANTILLONS			NIVEAU D'EAU (m)
			Ø (mm)	ETAT	R.Q.D	RECUP %	ECHAN	COTE (mm)	
0,00 à 0,20		0,2 Terre végétale		F					
0,20 à 10,30		10,10 tuf calcaire, avec des fragments de roches calcaires. La couleur est marron jaunatre.							
10,30 à 16,00		5,7 sable compact et quelques fois dur, intercalé par du sable lache et quelques passages de tuf pls au moins rigide. La couleur est jaunatre.	101	C/F		100	EP 4,4 4,7		
							SPT 9,6 9,88	1	R+2
				C/F		90			
						20			
		Fin de sondage à 16,00 m de profondeur							
Page n° : .....			ETAT DE L ESSAI			ECHANTILLONS			
Coordonnées: .....			C : Compact			P.C : Prélèvement en Continu			
Echelle: .....			D : Desintégré			E.P : Echantillon paraffine			
Etablie par : .....			F : Fragmenté			E.I : Echantillon Intact			
			T : Decanté						
OBSERVATIONS: .....									



Client : Systra/Getinsa/setirail  
 Projet : Boumedfaa - Djelfa  
 Sondage : Sc 107 – Caisse n°01/07  
 Profondeur : 0,00 à 2,40 m



Client : Systra/Getinsa/setirail  
 Projet : Boumedfaa - Djelfa  
 Sondage : Sc 107 – Caisse n°02/07  
 Profondeur : 2,40 à 4,80 m.



Client : Systra/Getinsa/setirail  
 Projet : Boumedfaa - Djelfa  
 Sondage : Sc107 – Caisse n°03/07  
 Profondeur : 4,80 à 7,00 m



Client : Systra/Getinsa/setirail  
 Projet : Boumedfaa - Djelfa  
 Sondage : Sc 107 – Caisse n°04/07  
 Profondeur : 7,00 à 9,20 m



Client : Systra/Getinsa/setirail  
 Projet : Boumedfaa - Djelfa  
 Sondage : S 107 – Caisse n°05/07  
 Profondeur : 9,20 à 11,60 m

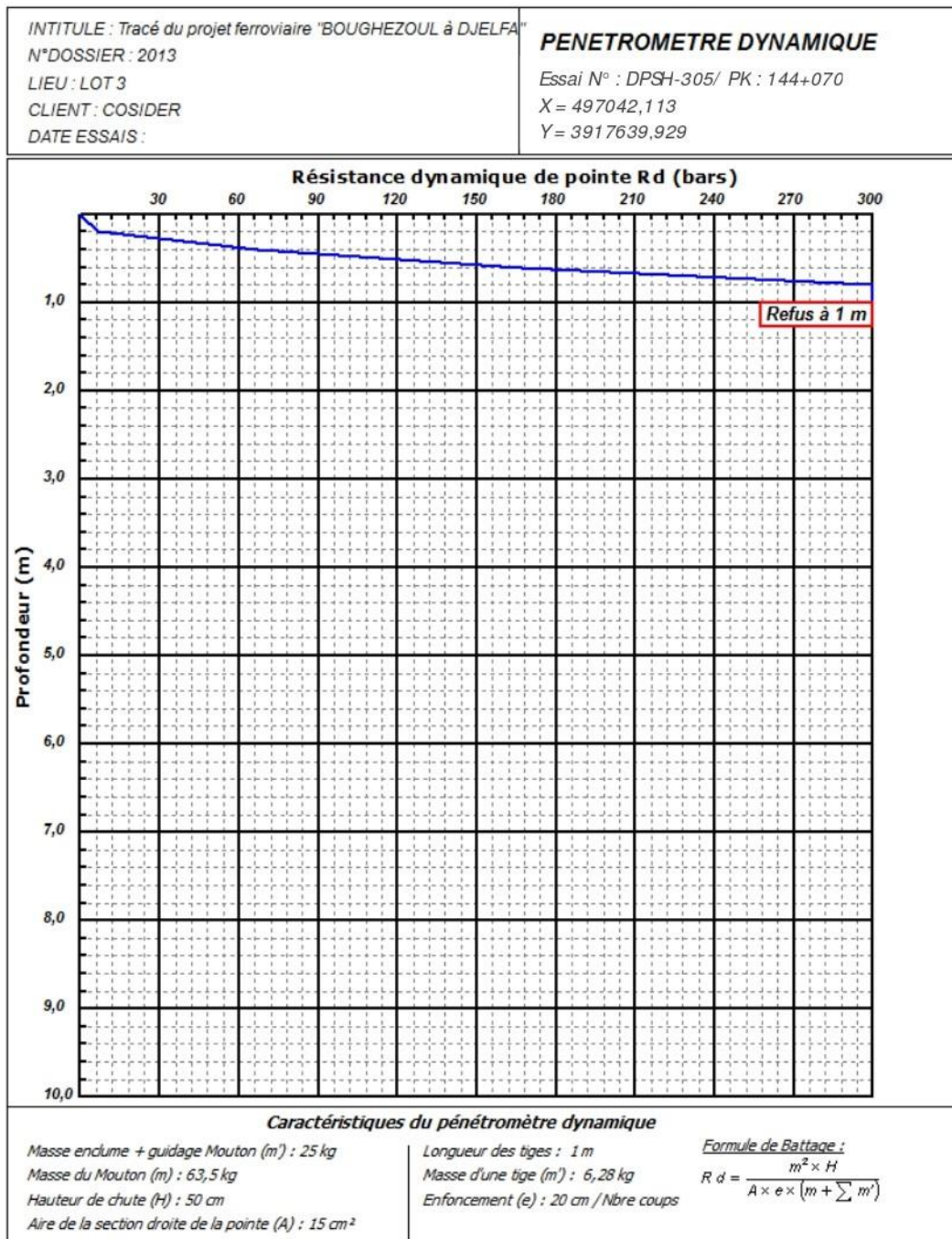


Client : Systra/Getinsa/setirail  
 Projet : Boumedfaa - Djelfa  
 Sondage : S 107 – Caisse n°06/07  
 Profondeur : 11,60 à 14,90 m



Client : Systra/Getinsa/setirail  
 Projet : Boumedfaa - Djelfa  
 Sondage : S 115 – Caisse n°07/07  
 Profondeur : 14,90 à 16,00 m

## Annexe B.3 : Pénétromètre dynamique PK 144+070



## Annexe B.4 : Analyse granulométrique PK 144+275


**GEO SOBESOL**  
 Etude Géotechnique & Géophysique

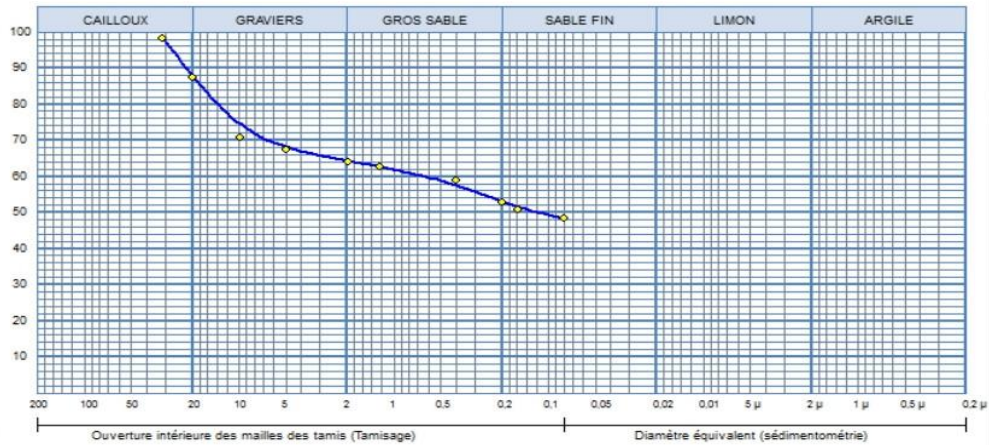
**RAPPORT D'ESSAI**  
**ANALYSE GRANULOMETRIQUE**  
 NFP 94-056 / NFP 94-057

 Client : COSIDER  
 Projet : Tracé du projet ferroviaire "BOUGHEZOUL à DJELFA"  
 Endroit : DJELFA

 N° Projet :  
 Réf. Client :  
 N° rapport :

 Sondage n° : P 315  
 Profondeur :  
 Matériaux :  
 Provenance : LOT 03  
 Date essais :

—◆— Sondage: P 315 :



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisé (%)	Diamètre équivalent	Tamisé (%)
31,50	98,48		
20,00	87,34		
10,00	70,87		
5,00	67,38		
2,00	64,09		
1,25	62,79		
0,40	58,89		
0,20	53,00		
0,16	51,03		
0,08	48,48		

Echant	< 80 $\mu$	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	48,48 %	%	%	0 %	GA

Echant	D60 (mm)	D30 (mm)	D10 (mm)	Cc	Cu
—◆—	0,55				

Remarque :

Préparé par :  
K.DAHMANIDate :  
28/05/2014

Approuvé par :

Date :

## Annexe B.5 : Limites d'Atterberg PK 144+275

<b>RAPPORT D'ESSAI</b> <b>Limites d'Atterberg</b> NF P 94 - 51																	
Client : COSIDER Projet : Tracé du projet ferroviaire "BOUGHEZOUL à DJELFA" Endroit :	N° Projet : Réf. Client : N° rapport : Rév :																
Echantillon n° : Sondage n° : P 315 Profondeur : Matériaux :	Provenance : LOT 03 Endroit de prélèvement : Prélevé par : Date prélèvement : Reçu le : Date essais :																
Limite de Liquidité (%) : WL = 77,53 Limite de Plasticité (%) : WP = 40,49 Indice de Plasticité (%) : IP = 37,04 Teneur en eau naturelle (%) : Weau = 120SC013.5																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Limite de plasticité</th> </tr> <tr> <th>Ech N°</th> <th>W (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>40,71</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>39,95</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>40,81</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	Limite de plasticité		Ech N°	W (%)	1	40,71	2	39,95	3	40,81						
Limite de plasticité																	
Ech N°	W (%)																
1	40,71																
2	39,95																
3	40,81																
Remarque :																	
Préparé par : Melle N. BOULDJA	Date : Approuvé par : Date :																

## Annexe B.6 : Equivalent de sable PK 144+275



**GEO SOBESOL**  
Etude Géotechnique & Géophysique

*ESSAI EQUIVALENT DE SABLE*  
*NFP 18 - 598*

Date :	26/05/2014
Projet	Tracé du projet ferroviaire reliant BOUGHEZOUL à D.JELEA
Client :	COSIDER
Provenance :	LOT N° 3
Nature :	PUT N° 315

Hauteur totale H1	Hauteur de sable mesurée au piston H2'	ES piston H2'/H1*100
34,3	1,6	4,66
33,8	1,4	4,14

ES piston moyen=	4,40
------------------	------

Observation	Ingénieur superviseur
	K.DAHMANI

## Annexe B.7 : Valeur au bleu de méthylène VBS PK 144+275



**GEO SOBESOL**  
Etude Géotechnique & Géophysique

ESSAI AU BLEU DE METHYLENE  
NFP 94 - 068

Date :	26/05/2014
Projet	Tracé du projet ferroviaire reliant BOUGHEZOUL à DJELFA
Client :	COSIDER
Provenance :	LOT N° 3
Puit :	P 315
Nature :	TUF

Masse des fines (gr)	60
volume de la solution injectée (cm <sup>3</sup> )	17
C (%) tamis 5mm	67%
valeur au bleu (VBS)	$VBS = (B/M) * C * 100$

VBS =	0,191
-------	-------

Observation	Ingénieur superviseur
	K.DAHMANI

## Annexe B.8 : Essai Proctor PK 144+275

**GEO SOBESOL**

Etude Géotechnique &amp; Géophysique

RAPPORT D'ESSAI ESSAI PROCTOR NF P94-093																					
Client : COSIDER Projet : Tracé du projet ferroviaire "BOUGHEZOUL à DJELFA" Endroit : DJELFA		N° Projet : Réf. Client : N° rapport :                      Rév :																			
Echantillon n° : Sondage n° : P 315 Profondeur : Matériaux : Provenance : LOT 03		Endroit de prélèvement : Prélevé par : Date prélèvement : Reçu le : Date essais :  Densité des grains : 2,65 Refus à 20mm (%) : 12,64																			
<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px; margin-bottom: 5px;"> <math>\gamma_d \text{ max} = 1,65 \text{ (t/m}^3\text{)}</math>  <math>W_{opm} = 10,7 \text{ (\%)}</math> </div> <div style="float: right; margin-top: 10px;"> <p><b>MOULE</b></p> <p>Proctor <input type="checkbox"/></p> <p>CBR <input checked="" type="checkbox"/></p> <p><b>ENERGIE</b></p> <p>Normal <input type="checkbox"/></p> <p>Modifié <input checked="" type="checkbox"/></p> <p><b>Densité des grains</b></p> <p>Estimée <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Sr = 80 % e <input type="checkbox"/></p> </div>																					
<p><b>TABLEAU DE RESULTATS DES MESURES</b></p> <table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse; width: 80%;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">W (%)</td> <td style="padding: 5px;">9,9</td> <td style="padding: 5px;">11,9</td> <td style="padding: 5px;">13,9</td> <td style="padding: 5px;"></td> <td style="padding: 5px;"></td> <td style="padding: 5px;"></td> <td style="padding: 5px;"></td> <td style="padding: 5px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Densité (T/m3)</td> <td style="padding: 5px;">1,54</td> <td style="padding: 5px;">1,56</td> <td style="padding: 5px;">1,55</td> <td style="padding: 5px;"></td> <td style="padding: 5px;"></td> <td style="padding: 5px;"></td> <td style="padding: 5px;"></td> <td style="padding: 5px;"></td> </tr> </tbody> </table>				W (%)	9,9	11,9	13,9						Densité (T/m3)	1,54	1,56	1,55					
W (%)	9,9	11,9	13,9																		
Densité (T/m3)	1,54	1,56	1,55																		
Remarque :																					
Préparé par : K.DAHMANI		Date : 26/06/2014																			
Approuvé par :		Date :																			

© Sobesol 2007

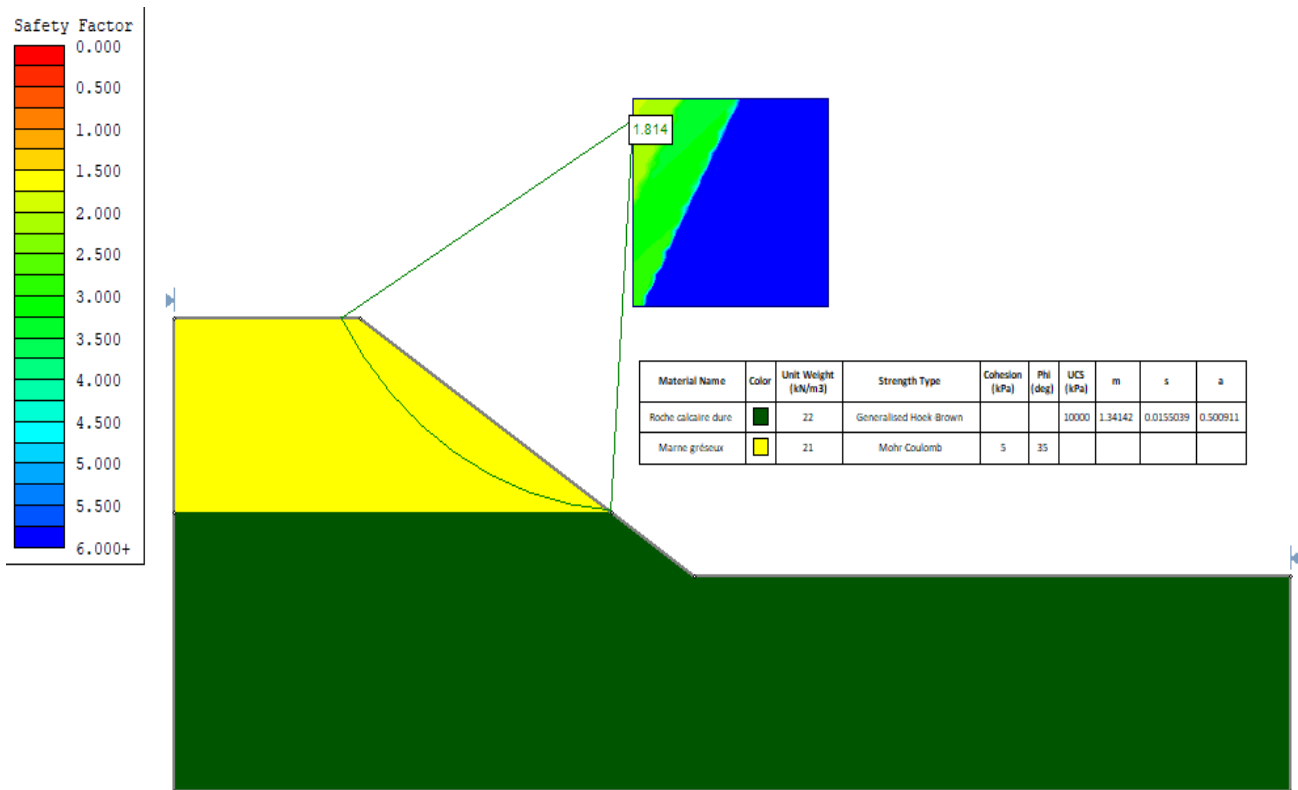
**Annexe C.1 : Conditions générales de réutilisation des matériaux en œuvre ayant pour base le code UIC 719R**

Classe du sol (code UIC 719R)	Dépôt	Remblais				Partie inférieure du remblai et partie supérieur du remblai	Couche de forme	Couche De fondation	Éperons, Masques et couches drainants	Bétons	Sous-ballast
		Noyau									
		Remblai on sols	Sol - Enrochement	Enrochement							
QS0	×										
QS1.1	×	×									
QS1.2		×	×		×						
QS2		×	×	×	×						
QS3.1		×	×	×	×	×		×	×		
QS3.2		×	×	×	×	×	×	×	×	×	

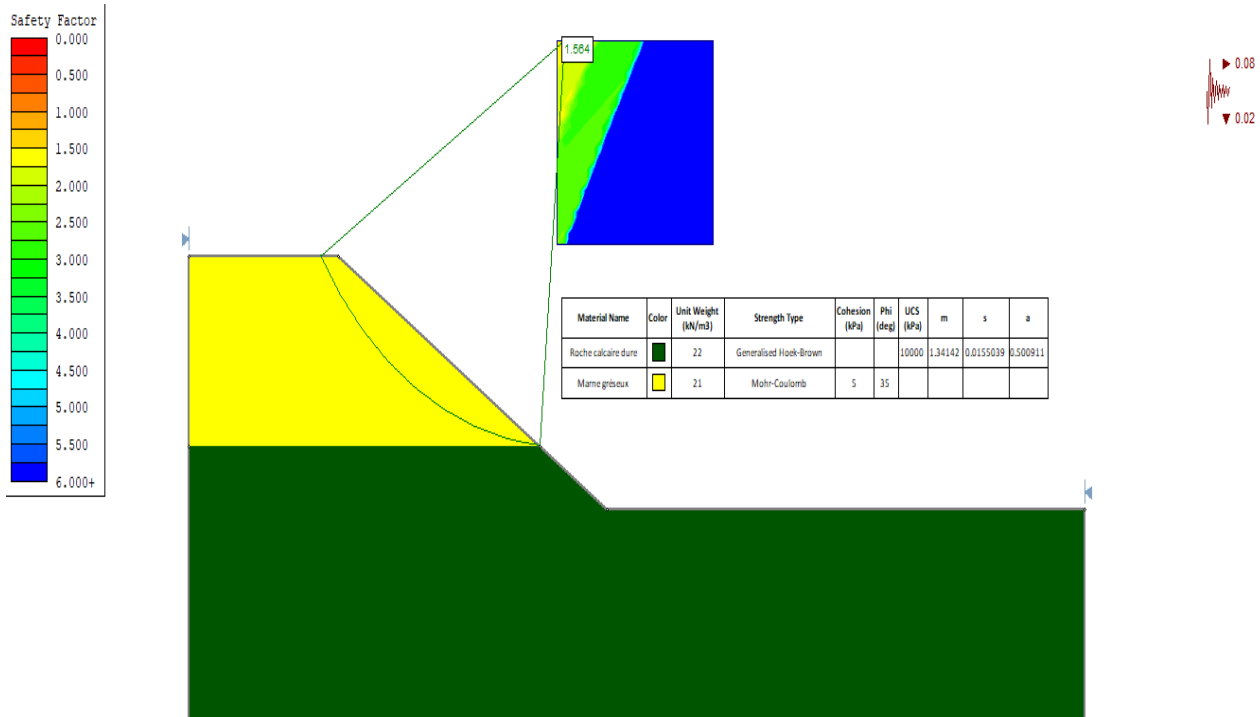
## Annexe C.2 : Les coefficients de la formule de calcul d'épaisseur

Paramètres	Valeur	Caractéristiques
<b>E</b>	0.70	Pour les plateformes de classe P1
	0.55	Pour les plateformes de classe P2
	0.45	Pour les plateformes de classe P3
<b>a</b>	0	Pour les groupes UIC1 et 2 (ou les lignes à vitesse $\geq 160$ km/h quelque que soit le groupe UIC)
	-0.05	Pour les groupes UIC 3 et 4
	-0.10	Pour les groupes UIC 5,6 et 7, 8,9 avec voyageurs
	-0.15	Pour les groupes UIC 7,8 et 9 sans voyageurs
<b>b</b>	0	Pour les traverses bois de longueur = 2.60 m
	$(2.50-L) / 2$	Pour les traverses en béton de longueur L
<b>c</b>	0	Pour un dimensionnement normal
	-0.10	A titre exceptionnel dans les opérations difficiles sur les lignes existantes de groupe UIC 7,8 et 9 sans voyageurs
	-0.05	A titre exceptionnel dans les opérations difficiles sur les lignes existantes de groupe autres que UIC 7,8 et 9 sans voyageurs
<b>d</b>	0	Quand la charge maximale des essieux < 200 KN
	+0.05	Quand la charge maximale des essieux < 225 KN
	+0.12	Quand la charge maximale des essieux < 250 KN
<b>f</b>	0	Les lignes à $V \leq 160$ km/h et les plateformes de classe P3
	+0.05	Pour les plateformes de classe P2
	+0.01	Pour les plateformes de classe P1
<b>g</b>	+géotextile	Lorsque la couche de forme est en sol QS1 et QS2
	0 (pas de géotextile)	Lorsque la couche de forme est en sol QS3

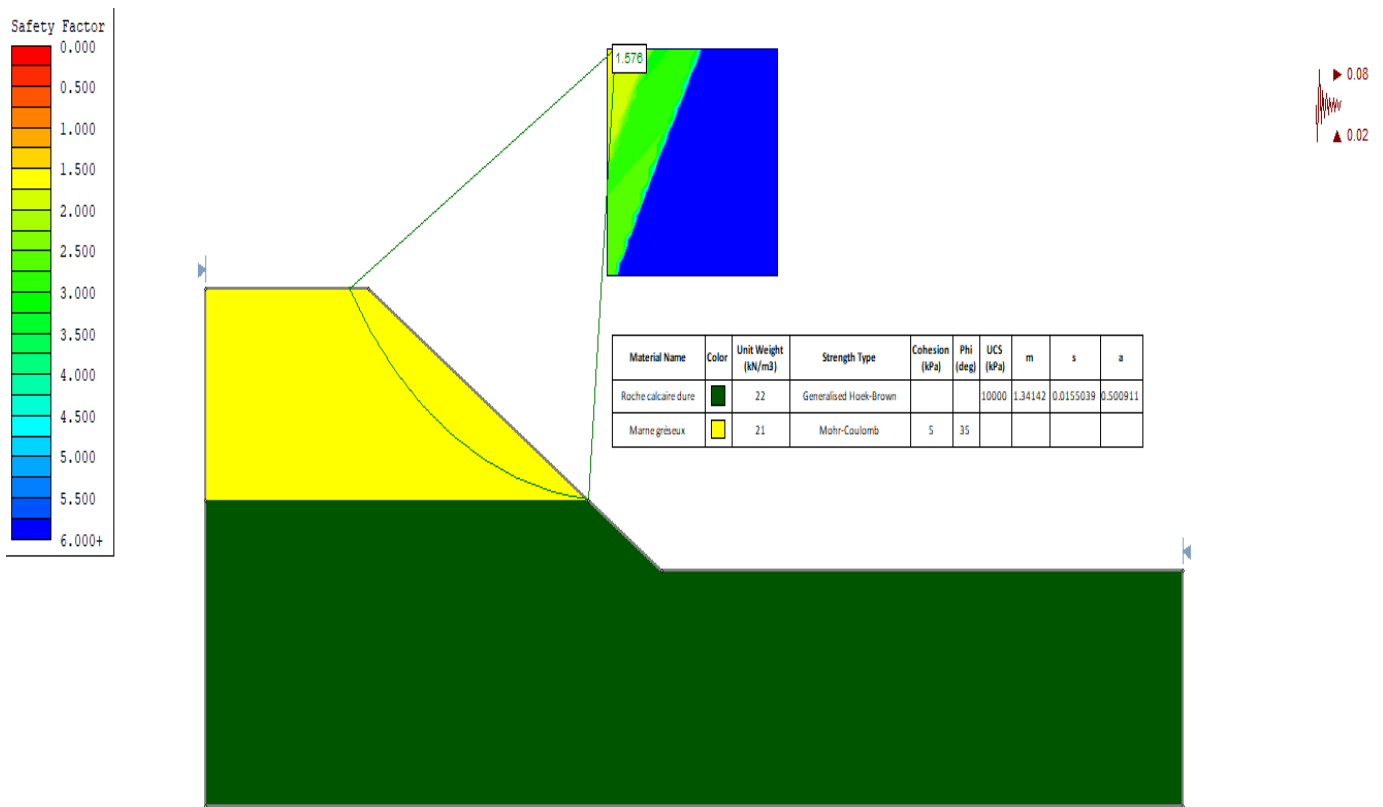
Annexe C.3 : vérification de stabilité des talus en déblais avec logiciel SLIDE 6.0



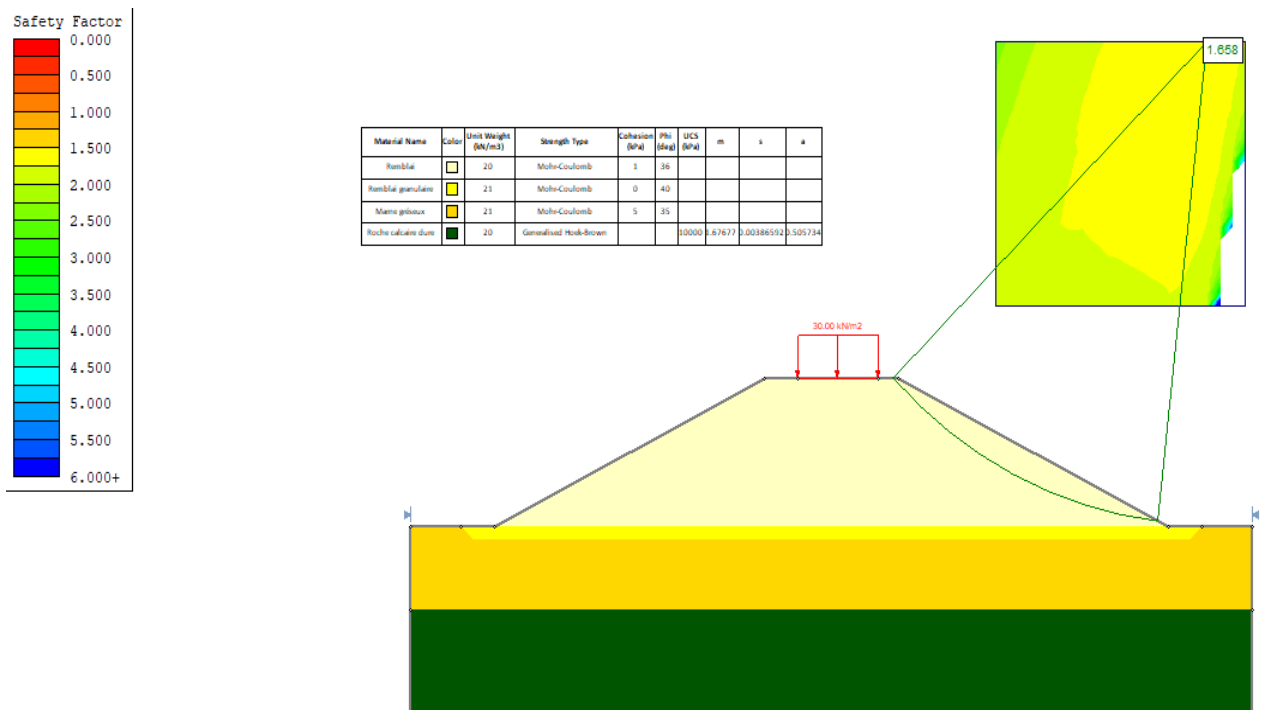
Analyse de stabilité pour la géométrie de 1/1,5 (V/H). Situation statique au PK 143+450.



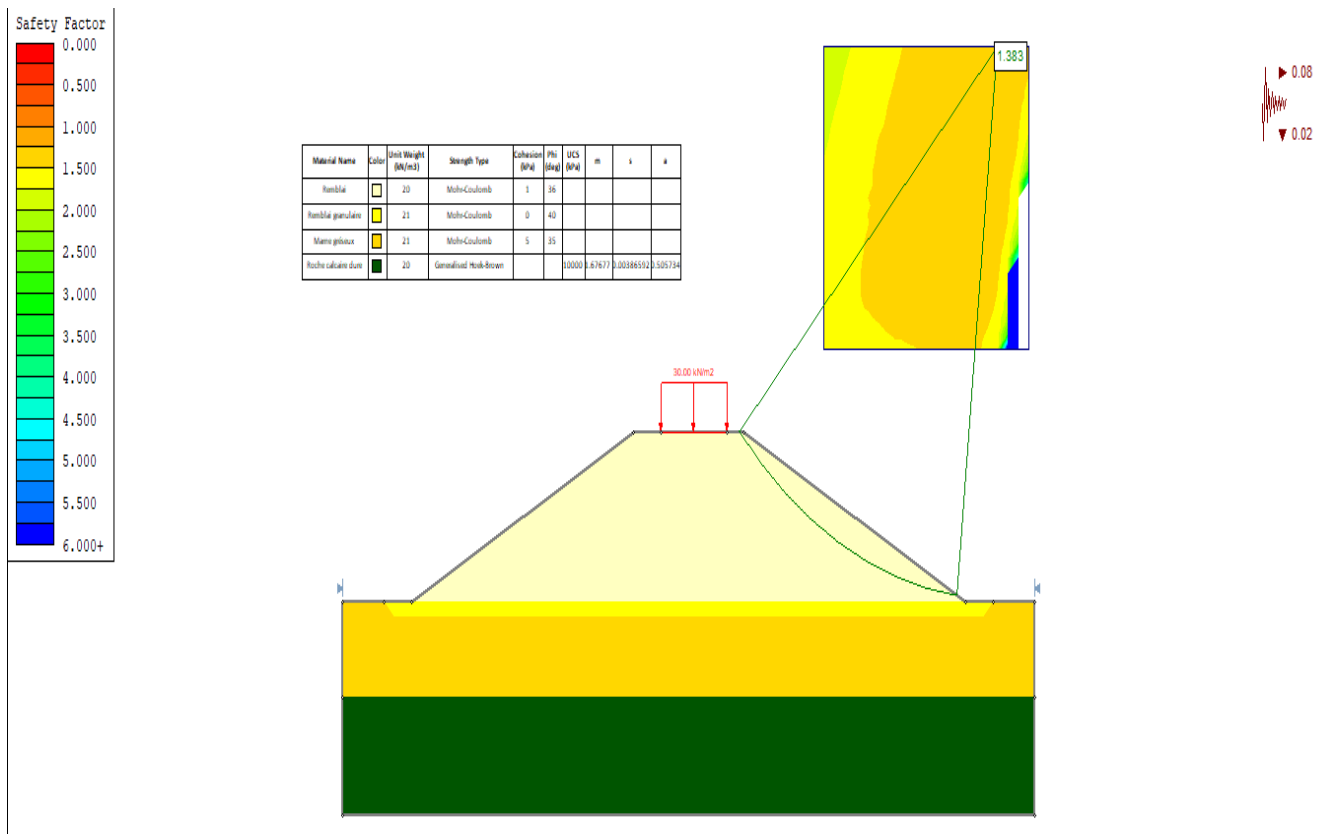
Analyse de stabilité pour la géométrie de 1/1,5 (V/H). Situation pseudo statique (kh = 0.08; kv = +0.02) au PK 143+450.



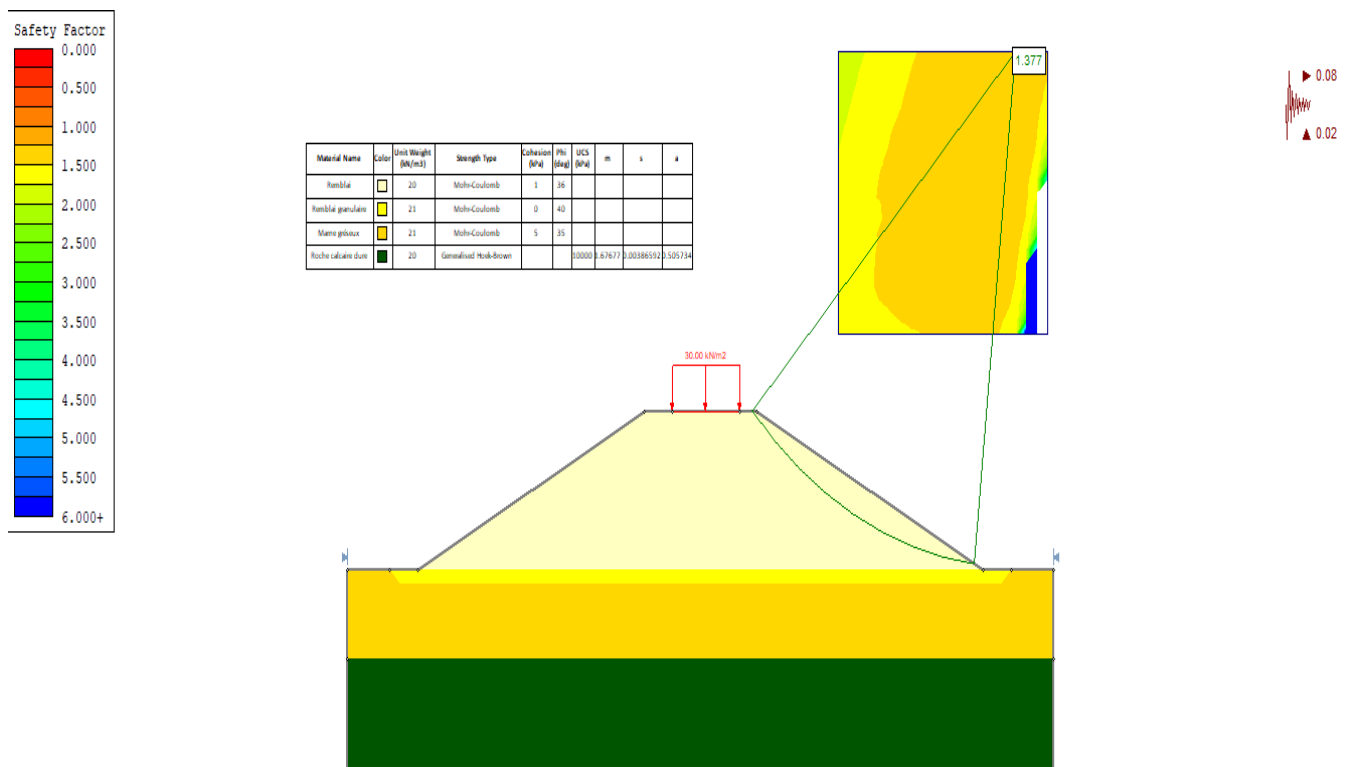
Analyse de stabilité pour la géométrie de 1/1,5 (V/H). Situation pseudostatique (kh = 0.08; kv = -0.02) au PK 143+450.



Analyse de la stabilité pour la géométrie de 1/2 (V/H). Situation statique au PK 144+050

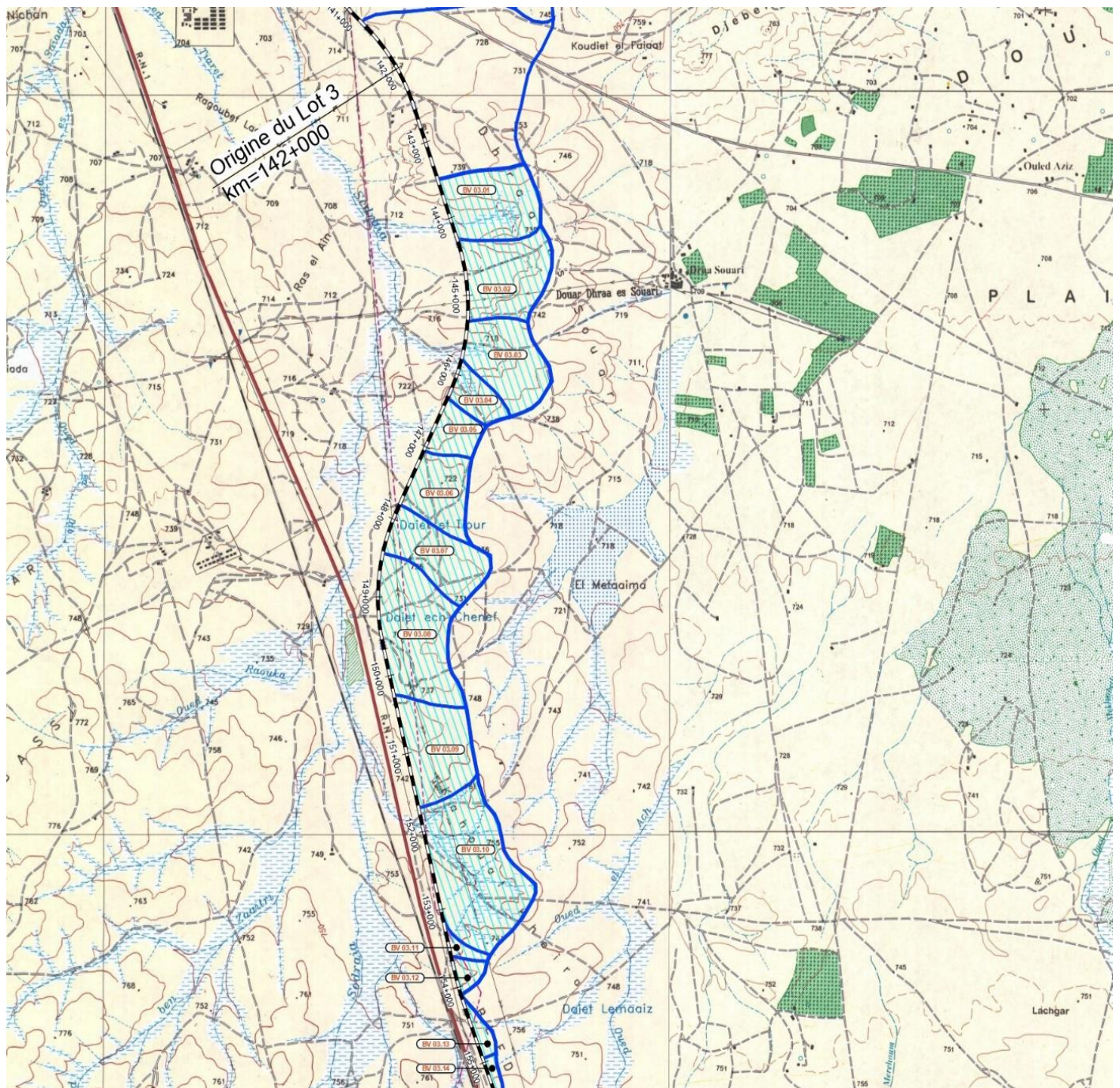


Analyse de la stabilité pour la géométrie de 1/2 (V/H). Situation pseudo statique (kh = 0.08; kv = +0.02) au PK 144+050



Analyse de la stabilité pour la géométrie de 1/2 (V/H). Situation pseudo-statique (kh = 0.08; kv = -0.02) au PK 144+050

## Annexe D.1 : Délimitation des bassins versants traversés par notre tronçon



## Annexe D.2 : Valeurs des débits de pointe de crue

N°BV	Pk	A [km <sup>2</sup> ]	C	J	Tc (h)	I (100ans) [mm/h]	Débit de Pointe de Crue [m <sup>3</sup> /s]
1	144+075	1,03	0,38	0,022	0,87	43,87	4,77
2	144+725	1,08	0,38	0,013	1,16	34,78	3,96
3	145+645	0,97	0,38	0,021	0,86	44,11	4,52
4	145+900	0,34	0,38	0,029	0,44	76,86	2,76
5	146+750	0,36	0,38	0,016	0,60	59,03	2,24
6	147+575	0,7	0,38	0,006	1,37	30,31	2,24
7	147+925	0,88	0,38	0,006	1,54	27,63	2,57
8	148+525	1,52	0,38	0,007	1,87	23,57	3,78
9	150+475	1,04	0,38	0,016	1,03	38,41	4,22
10	151+975	1,98	0,38	0,01	1,79	24,46	5,11
11	153+400	0,1	0,38	0,03	0,23	127,91	1,35
12	153+800	0,14	0,38	0,02	0,34	94,71	1,40
13	154+650	0,13	0,38	0,008	0,51	67,34	0,92

## Annexe D.3 : Les différents ouvrages transversaux du projet

N°BV	Pk	Ouvrages Prévus	Matériel	Q <sub>100</sub>	K <sub>s</sub>	I	Section			Sm	Qps	Vps
							D	H	B			
1	144+059	Dalot	BA	4,77	70	0,005	-	1.5	1.5	1.8	7.02	3.12
2	144+714	Dalot	BA	3,96	70	0,01	-	1.5	1.5	1.8	9.92	4.41
3	145+700	Dalot	BA	4,52	70	0,005	-	1.5	1.5	1.8	7.02	3.12
4	145+800	Buse	BA	2,76	80	0,01	1,2	-	-	0,72	4.05	5.6
5	146+800	Buse	BA	2,24	80	0,01	1,2	-	-	0,72	4.05	5.6
6	147+550	Buse	BA	2,24	80	0,005	1,2	-	-	0,72	2.87	3.96
7	147+875	Buse	BA	2,57	80	0,005	1,2	-	-	0,72	2.87	3.96
8	148+500	2 × Buse	BA	3,78	80	0,005	1,2	-	-	0,72	2.87	3.96
9	150+450	Buse	BA	4,22	80	0,005	1,5	-	-	1.13	5.20	4.60
10	152+012	Dalot	BA	5,11	70	0,005	-	2	2	1.8	15.11	3.78
11	153+370	Buse	BA	1,35	80	0,01	1	-	-	0,50	1.37	4.96
12	153+800	Buse	BA	1,4	80	0,01	1	-	-	0,50	1.37	4.96
13	154+650	Buse	BA	0,92	70	0,01	1	-	-	0.50	1.37	4.96

## Annexe D.4 : Vérification les conditions d'auto curage

Pk	Ouvrages Prévus	Vérification les conditions d'auto curage :										Rh	Rh < 0.8
		V > 0.6 m/s pour Q = 0.1Qps					V > 0.3 m/s pour Q = 0.01Qps						
		Rq	Rv	Vps	V	V > 0.6 (m/s)	Rq	Rv	Vps	V	V > 0.3 (m/s)		
144+075	Dalot	0,1	0,638	3.12	1,99	Vérifiée	0,01	0,315	3.12	0,98	Vérifiée	0,606	Vérifiée
144+725	Dalot	0,1	0,638	4.41	2,81	Vérifiée	0,01	0,315	4.41	1,39	Vérifiée	0,433	Vérifiée
145+645	Dalot	0,1	0,638	3.12	1,99	Vérifiée	0,01	0,315	3.12	0,98	Vérifiée	0,584	Vérifiée
145+900	Buse	0,1	0,638	5.6	3.57	Vérifiée	0,01	0,315	5.6	1.76	Vérifiée	0,551	Vérifiée
146+750	Buse	0,1	0,638	5.6	3.57	Vérifiée	0,01	0,315	5.6	1.76	Vérifiée	0,551	Vérifiée
147+575	Buse	0,1	0,638	3.96	2.52	Vérifiée	0,01	0,315	3.96	1.24	Vérifiée	0,551	Vérifiée
147+925	Buse	0,1	0,638	3.96	2.52	Vérifiée	0,01	0,315	3.96	1.24	Vérifiée	0,551	Vérifiée
148+525	Buse	0,1	0,638	3.96	2.52	Vérifiée	0,01	0,315	3.96	1.24	Vérifiée	0,551	Vérifiée
150+475	Buse	0,1	0,638	4.60	2.93	Vérifiée	0,01	0,315	4.60	1.44	Vérifiée	0,551	Vérifiée
151+975	Dalot	0,1	0,638	3.78	2,41	Vérifiée	0,01	0,315	3.78	1,19	Vérifiée	0,401	Vérifiée
153+400	Buse	0,1	0,638	4,96	3,16	Vérifiée	0,01	0,315	4,96	1,56	Vérifiée	0,551	Vérifiée
153+800	Buse	0,1	0,638	4,96	3,16	Vérifiée	0,01	0,315	4,96	1,56	Vérifiée	0,551	Vérifiée
154+650	Buse	0,1	0,638	4,96	3,16	Vérifiée	0,01	0,315	4,96	1,56	Vérifiée	0,206	Vérifiée

