REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : géotechnique

Dimensionnement de la structure d'assise ferroviaire « Application au projet à voie unique SAIDA-ELBAYAD De PK29+000 au PK 55+000 »

Présenté par
Mr : BOUZEMLAL Abderraouf
Mr : DEGHICHE Oussama

Proposé et Dirigé par
Dr : KHIATINE Mohamed

Promotion Juin 2022

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr : KHIATINE Mohamed pour ses compétentes appréciations, ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.

Nous remercions vivement nos parents pour leurs soutiens.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers tous les Enseignants et le personnel administratif de l'université YAHYA Farès qui ont contribué à notre formation et à l'élaboration de ce présent travail

Nous remercions tous les étudiants de la spécialité Génie-Civil, option Géotechnique que nous avons partagée avec eux un agréable moment qui restera gravé à nos mémoires à jamais.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail. Et de l'enrichir par leurs propositions.

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

ملخص

يتكون هذا المشروع بشكل أساسي من دراسة الابعاد لقسم من خط السكك الحديدية المكهربة الجديد ذو المسار الواحد سعيدة -البيض، من pk 29 + 000 إلى Pk 55 + 000
لمسافه خطيه تقدر ب 26 كم، يمتد مشروعنا أيضًا إلى تحديد أبعاد هيكل المقعد والنمذجة الرقمية لسلوك السدود عبر Plaxis-Geostudio 2012
بالنسبة للردم، سوف يعتمد اختيار المواد لخط السكة الحديد المخطط على الدراسة الجيوتقنية والمعايير وكذلك توصيات (UIC). والاتحاد الدولي للسكك الحديدية (SNTF) والشركة الوطنية للنقل بالسكك الحديدية GTR

الكلمات المفتاحية: الدراسة الجيوتقنية ، البنية الأساسية ، حركات الأرض ، النمذجة العددية.

Résumé

Le présent projet consiste essentiellement au dimensionnement d'un tronçon de la nouvelle ligne ferroviaire électrifiée à voie unique Saida \ El Bayadh, Du pk 29+000 au Pk 55+000, pour un linéaire de 26 Km, notre projet s'étale aussi au dimensionnement de la structure d'assise et modélisation numérique du comportement des remblais via le Plaxis et Géostudio 2012.

Pour les remblais en choix des matériaux de la ligne ferroviaire projetée sera basée sur l'étude géotechnique et les normes ainsi que les recommandations GTR et la société nationale des transports des chemins de fer (SNTF) et l'union internationale des chemins de fer (UIC).

Mots clés : Etude géotechnique, Structure d'assise, Mouvements des terres, Modélisation numérique.

Abstract

This project essentially consists of the dimensioning of the seat structure of a section of the new single-track electrified railway line Saida \ El Bayadh, From pk 29+000 to Pk 55+000, for a linear of 26 Km, our project is also spreads to the dimensioning of the seat structure and digital modeling of the behavior of the embankments via Plaxis and Geostudio 2012.

For the embankments, the choice of materials for the planned railway line will be based on the geotechnical study and the standards as well as the recommendations of the GTR and the national railway transport company (SNTF) and the international union of railways (UIC).

Keywords: Geotechnical study, Base structure, Earth movements, Numerical modeling.

SOMMAIRE

Introduction General ……1
CHAPITRE I. Recherche bibliographique
I. Introduction……2
I.1. Infrastructures d transport……2
I.2. Historique des chemins de fer……5
I.3. Superstructure de la voie ferrée……9
I.4. Ouvrage d'art……22
I.5 Ouvrages hydrauliques……23
I.6 Electrification de la voie ferrée……25
I.7 Signalisation……28
I.8 Gare……31
I.9 Caractéristiques géométriques d'une ligne ferroviaire……35
I.10 Profil en long……37
I.11 Profil en travers……39
I.12 Terrassements……41
I.13 Etude d'impact sur l'environnement……46
I.14 Conclusion ……47

CHAPITRE II. Présentation projet
II. Introduction ……48
II.1. Description globale du projet……48
II.2. Localisation du projet……49
II.3. Présentation de la wilaya de Saida……50
II.4. Sismicité……54
II.5. Eude géologique……54
II.6. Caractéristiques de base du projet……56
II.7. Conclusion……57

CHAPITRE III. Etude Géotechnique Et Dimensionnement De La Structure D''assise
III. Introduction……58
III.1. Campagne de reconnaissance géotechnique……58
III.2.. Essais au laboratoire ……61
III.3. Dimensionnement de la structure d'assise……76
III.4. Application au projet……81
III.5. Profil en travers……83
III.6. Recommandations pour les différentes couches de la voie ferrée……85
III.7. Conclusion……91

CHAPITRE IV. Modélisation numérique de la structure d'assise
IV. Introduction ……92
IV.1. Logiciel Plaxis……93
IV.2 Le Logiciel Geostudio……96
IV.3 Analyse de la stabilité des remblais application sur notre projet:……104
IV.4- Calculs détaillés de la stabilité du remblai à l'aide du code Plaxis……109
IV.5. Synthèse……113

Conclusion General ……114

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I. Recherche bibliographique

Tableau I.1 : longueurs minimales des alignements……..28

CHAPITRE II. Présentation projet

Tableau II.1 : Précipitations moyennes mensuelles et moyenne annuelle à la station De Saida, pour la période 1970-2009……...51
Tableau II.2. Pluies maximales annuelles……53
Tableau II.3. Pluies maximales journalière……..53

CHAPITRE III. Etude Géotechnique Et Dimensionnement De La Structure D''assise

Tableau III. 1. Programme de reconnaissance géotechnique (essai in situ)…….59
Tableau III. 2: programme de reconnaissance géotechnique (Essais au laboratoire)……61
Tableau III. 3 : Récapitulation des résultats du PDL……..63
Tableau III.4. Implantation et description des sondages pressiométrique…….64
Tableau III. 5: Implantation et description des sondages carottés……..67
Tableau III. 6: Implantation et description des puits de reconnaissances……..69
Tableau III. 7 : classification du sol en fonction de la compressibilité (XP P 94-090-1)……...72
Tableau III.8 : Résultats des essais au laboratoire……73
Tableau V.9 : Résultats des essais au laboratoire……74
Tableau III.10 : Résultats de classification des sols……..75
Tableau III.11. Utilisation de matériau en remblai……..76
Tableau III.12. La classe de portance de la plateforme……79
Tableau III.13. Paramètre de dimensionnement de la sous-couche……..82
Tableau III.14. Épaisseurs des couches……82

CHAPITRE IV. Modélisation numérique de la structure d'assise

Tableau IV.1 : paramètres géotechniques de la structure d'assise. ……105
Tableau IV.2 : paramètres géotechniques caniveau+terre végétale……105
Tableau IV.3 : valeurs du facteur de sécurité sous chargement gravitaire……106
Tableau IV.4 : Valeurs du facteur de sécurité sous chargement 25T et nappe d'eau……107
Tableau IV.5 : Valeurs de FS sous effet combiné du chargement gravitaire, 25 T, séisme et de la nappe……109
Tableau IV.6 : Récapitulation des résultats des valeurs du Facteur de Sécurité par MEL……..109

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I. Recherche bibliographique

Figure I-1 : les réseaux ferroviaires en Algérie……..5
Figure I-2 : Infrastructure de la voie ferrée……5
Figure I-3 : Profil en travers d'une voie ferrée……...7
Figure I-4 : le rail UIC 60……..8
Figure I-5 : le rail Vignole……9
Figure I-6 : le rail gorge pour les lignes tramway……9
Figure I-7 : le rail double champignon……..10
Figure I-8 : l'éclissage……10
Figure I-9 : Soudure D'un Appareil De Voie En Pose……11
Figure I-10 : Traverses en bois……..12
Figure I-11 : traverses monobloc et bi-bloc……12
Figure I-12 : traverses métalliques……13
Figure I-13 : traverses en composites……..13
Figure I-14 : travelage……14
Figure I-15 : Attache élastique Nabla et Attache élastique E-Clip……...15
Figure I-16 : Liaison rail-traverse……...15
Figure I-17 : Le ballast……16
Figure I-18 : une gare en chine……..16
Figure I-19 : Branchement simple……17
Figure I-20: Branchement double……..17
Figure I-21: Branchement Junction double……..18
Figure I-22: PRA Pont-rail……..18
Figure I-23: Ouvrages de drainage (buses et dalots)……19
Figure I-24: Drainage longitudinale de la voie ferrée Tiaret-Saida PK 108……20
Figure I-25: Schéma exemplaire d'une alimentation avec le système 1X25KV……21
Figure I-26: Pantographe……22
Figure I-27: Un massif de la caténaire……22
Figure I-28: Le système européen de contrôle de la signalisation (ERTMS) niveau 1……24
Figure I-29: Garage franc……26
Figure I-30: La longueur utile de stationnement et garage franc……26
Figure I-31: Un heurtoir……...26
Figure I-32 : Schéma de la gare de Sidi Ahmed W.Saida ……27
Figure I-33 : éléments du raccordement circulaire avec clothoïde……..29
Figure I-34 : Eléments géométriques du profil en long……..30
Figure I-35 : profil en travers types d'une voie double…….. 32
Figure I.36 : Structure d'un remblai courant……..34
Figure I.37 : Structure d'un remblai en zone inondable……35

CHAPITRE II. Présentation projet

Figure II.1 : Vue satellitaire du projet Saida-El Bayadh…… 38
Figure II.2 : Vue satellitaire du secteur de tracé concerné par l'étude……39
Figure II.3 : Le relief en allant de Saida vers EL Bayadh……..40
Figure II.4 : Situation du tronçon ferroviaire sur la carte des bassins versant de l'Algérie……..41
Figure II.5 : Carte de zonage sismique d'Algérie (RPOA 2008)……..42
Figure II.6 : Situation de la zone d'étude sur l'extrait de la carte géologique au 1/500000……44

CHAPITRE III. Etude Géotechnique Et Dimensionnement De La Structure D''assise

Figure III.1 : Profil d'essai au pénétromètre dynamique lourd (PK 32+000)……..48
Figure III.2. Profil pressiométrique de l'essai SP06 PK 49+664……..51
Figure III.3 : photos de sondage F-10-SB……52
Figure III. 4 : photos puit de reconnaissance PU-13……..54
Figure III.5. Structure d'assise ferroviaire……62
Figure III.6. Classe de la qualité du sol suivant la norme UIC-719R.P34……..63
Figure III.7. Structure du profil en travers du projet……69
Figure III.8. Courbe granulométrique prescrite pour un ballast de voie principale……71
Figure III.9. Le coefficient de la dureté relative globale……72
Figure III.10. Tableau de prescriptions pour ballast de voie ferrée pour les classes 1 et 2 selon EN 13450……72

CHAPITRE IV. Modélisation numérique de la structure d'assise

Figure IV.1 : Modèle géométrique du projet……76
Figure IV.2 : Maillage du projet……76
Figure IV.3 : Génération des contraintes effectives initiales……77
Figure IV.4 : Génération des surpressions en présence de la nappe phréatique……77
Figure IV.5 : Fenêtre des phases de calculs……...78
Figure IV.6 : exemples de courbes du facteur de sécurité en fonction du déplacement……..78
Figure IV.7 : Fenêtre du logiciel Geostudio 2012……79
Figure IV.8 : Fenêtre d'analyse du module SIGMA / W……81
Figure IV.9: Les régions de domaine et le niveau de la nappe phréatique……82
Figure IV.10: les propriétés des matériaux du domaine……82
Figure IV.11 : Fenêtre du Solve Manager……83
Figure IV.12: Illustration du placement de remblai par des ascenseurs……84
Figure IV.13 : Vue de l'arbre d'analyse……85
Figure IV.14 : Configuration pour la première couche (ascenseur 1)……..85
Figure IV.15 : Configuration pour la deuxième couche (ascenseur 2)……86
Figure IV.16 : Cercle de rupture critique et valeur du FS sous chargement gravitaire……88
Figure IV.17 : Cercle de rupture critique et la valeur du FS sous G et nappe……89
Figure IV.18 : Cercle de rupture critique et la valeur du facteur de sécurité sous effet combiné……...90
Figure IV.19 : Profil du remblai étudié par le code PLAXIS……..91
Figure IV.20 : Caractéristiques de chaque phase de calcul sous PLAXIS……91
Figure IV.21 : Déplacements totaux sous effet combiné……...92
Figure IV.22 : Position des lignes de rupture sous effet combiné……92
Figure IV.23 : Courbes du facteur de sécurité en fonction du déplacement……..93

Symboles et Abréviations

EI : échantillon intact.

ER : échantillon remanié.

WL : Limite de Liquidité

WP : Limite de Plasticité

ɣd : Densité sèche (t/m3)

WOPM: Teneur en eau optimale (%)

VBS : valeur de bleu de00+

UU : Cisaillement direct non consolidé et non drainé.

CD : Cisaillement direct consolidé et drainé.

Cu: cohésion (état finale)

φ : angle de frottement interne (état finale)

CC : Indice de compression

pc : pression de consolidation

INTRODUCTION GENERALE

Le transport est un service nécessaire pour de nombreuses activités de la vie courante c'est un élément important dans le développement d'un pays donc l'être humain a toujours chercher de le développer, il est même devenue de plus en plus sa préoccupation majeur, il essaie toujours d'exploiter la totalité de l'espace par le transport routier, chemins de fer, transport aérien et maritimes.

En Algérie, les secteurs des transports connaissent une véritable mutation. Un grand nombre de projets ont été réalisés où sont en phase de réalisation, afin de rendre ces secteurs plus performant et plus efficace dans ses contributions dans le développement économique du pays.

Parmi ces secteurs on trouve le secteur du transport ferroviaire qui a connu un développement remarquable dans les dernières années. Le réseau des chemins de fer algérien est aujourd'hui parmi les plus modernes d'Afrique. Il fait son apparition à la fin du XIXe siècle, il sert au transport de personnes et de marchandises aussi pour un but de désenclaver les régions éloignées du pays et d'assurer une croissance économique et sociale équilibrée. Parmi ces projets on compte la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique à trafic mixte « Voyageurs, Marchandises » électrifiée reliant la wilaya de Saida et El Bayadh desservant les villes de Saida, Ain El Hadjar, Sidi Ahmed, El Kheither, Bougtob, Toussemouline, Kef El Ahmar, El Bayadh, d'une longueur d'environ deux cent (200) km .

Notre présent projet de fin étude consiste à faire une étude géotechnique avant-projet détaillé « APD » d'un tronçon de cette nouvelle ligne situé dans la wilaya de Saida sur linéaire de 26 km allant de PK 29+000 jusqu'à PK 55+000 vers El Bayadh.

Ce travail est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons élaboré une recherche bibliographique la voie ferrée.

Le cœur de ce travail « projet de fin d'étude » s'articule autour de ces axes principaux :

- Présentation du projet.
- Etude géotechnique et dimensionnement de la structure d'assise ferroviaire.
- Modélisation numérique sur le comportement de la structure d'assise et le sol support.
- La mémoire se terminer par une conclusion général sur le travail effectuée .

Chapitre 01

Recherche bibliographique

I. Introduction

I-1 : Les infrastructures de transport :

C’est l'ensemble des installations fixes qu'il est nécessaire d'aménager pour permettre la circulation des véhicules et plus précisément le fonctionnement du système de transport. Les infrastructures sont généralement organisées en réseaux comportant des nœuds et des liens.
Ainsi le réseau ferroviaire est constitué de gares reliées entre elles par des lignes.
Les nœuds importants, comme les gares, sont aussi le point de contact et d'échange entre deux ou plusieurs modes de transport.

Elles constituent un élément primordial pour garantir la liberté de déplacement des personnes et des biens, et pour assurer le fonctionnement et le développement de l'économie. Leur création, qui est une partie importante de l'aménagement du territoire, nécessite le plus souvent des investissements lourds. Cela explique qu'elles soient le plus souvent prises en charge par la puissance publique. Toutefois, celle-ci en délègue quelquefois, pour des raisons de financement ou de savoir-faire, la construction et l'exploitation à des entreprises privées en contrepartie de la perception d'un péage (c'est le cas par exemple du tunnel sous la Manche) **[1].**

L'infrastructure désigne au sens strict la partie inférieure, le soubassement d'une voie. Le terme s'oppose à superstructure. On peut, dans certains cas, distinguer les deux : ainsi dans une ligne de chemin de fer, l'infrastructure est la plateforme de la voie, sur laquelle on pourrait aussi bien implanter une voie routière, tandis que la superstructure est constituée par la voie ferrée proprement dite (rails et traverses). Au sens large, l'infrastructure de transport désigne l'ensemble et englobe tous les éléments nécessaires à l'exploitation normale : caténaires, signalisation, postes d'aiguillage.

I-2 : Historique des chemins de fer :

Le chemin de fer est né sur le carreau des mines pour transporter le charbon, depuis les puits d’extraction jusqu'à la voie d’eau, qu’elle soit fluviale ou maritime. Dès le XVIIe siècle, les mineurs utilisèrent en effet des barres de guidage en bois pour faire glisser les chariots, avant d’adopter par la suite des rails métalliques. La traction était généralement assurée par les chevaux, jusqu'à l’apparition de la première locomotive à vapeur, mise au point par

l'ingénieur anglais Richard Trevithick en 1803, et testé avec succès dans le sud du pays de Galles. Cette découverte marqua le début de l'ère des chemins de fer.

La première voie ferrée au monde fut construite en 1825 en Angleterre, entre Stockton et Darlington, près de Newcastle (Yorkshire). Cette ligne transportait exclusivement du charbon, tout comme celles qui furent construites a la même époque en Ecosse, Ainsi que dans le Lancashire. C'est dans cette dernière région que fut implantée la première véritable ligne de chemin de fer, entre Liverpool et Manchester (51 Km). Mise en service en 1803, cette ligne aurait non seulement le transport du charbon, mais celui des voyageurs **[2]**.

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

Si les chemins de fer sont implantés sur les cinq continents, leur répartition apparait très inégale. De nombreux Etats, comme la plupart des pays africains, ne disposent que d'un petit nombre de voies ferrées, construite à l'époque coloniale, Comme le cas de L'Algérie dont les premières voies ferrées ont été établis pendant cette époque aux environs de 1863 et elles étaient toutes en écartement étroit (1055 mm) **[2].**

I.3-Transport ferroviaire en Algérie :

I-3.1 : LES DEBUTS DU CHEMIN DE FER EN ALGERIE :

La première ligne de chemin de fer en Algérie remonte en 1859. En effet dès 1853, la société Civile des Mines et Hauts-Fourneaux des Karezas, qui deviendra en 1864 a Compagnie des Minerais de Fer magnétiques de Mokta-el-Hadid, étudia un chemin de fer de 11 km de long, partant des mines des Karezas pour aboutir à La Seybouse, faubourg de Bône.

La construction fut assez longue et le service, uniquement minier, débuta le 1 er septembre 1859. C'était effectivement le premier chemin de fer de l'Algérie et, soulignons-le, il était à voie métrique, c'est à dire à l'écartement d'un mètre. La ligne fut prolongée en 1863 jusqu'aux mines d'Aïn-Mokra, et en 1867 jusqu'au port de Bône. Sa longueur était alors de 32,5 km.

Elle fut ouverte au service public en 1885 et prolongée en 1905 jusqu'à Saint Charles (sur la ligne Constantine-Philippeville). Sa longueur était ainsi portée à 97 km. Elle fut rachetée par l'Etat en 1926 et rattachée au réseau des Chemins de Fer Algériens de l'Etat, les C F A E.

De 1948 à 1952, la ligne fut mise à voie normale, tout en étant assez largement reconstruite puisque seuls les 32,5 km de l'ancienne ligne à voie métrique de Bône à Aïn-Mokra furent utilisés. La nouvelle ligne entra en service le 1er janvier 1953. Or, en novembre 1957, le tronçon Oued Zenati-Guelma de l'ancienne ligne directe Tunis -Constantine fut presque entièrement détruit par des inondations et il ne fut jamais reconstruit. Par suite, depuis cette date, la ligne de Bône à Saint-Charles est devenue partie intégrante de la grande ligne du Maghreb Tunis - Casablanca, donc presque un siècle après la création de son premier tronçon. Mettons à part cette ligne qui, initialement, était uniquement minière. Alors, la première compagnie ferroviaire proprement dite de l'Algérie fut la Compagnie des Chemins de Fer Algériens (sans aucun rapport avec la société puis l'office d'exploitation qui reprendre la même dénomination successive- ment en 1898 et en 1939). Cette compagnie obtient en 1860 la concession de trois lignes à voie normale: Alger -Blida, Oran -Saint- Denis-du-Sig et Constantine -Philippeville.

La première ouverte fut Alger-Blida le 8 septembre 1862, ceci pour une raison bien simple. L'armée avait commencé les travaux dès 1859, mais la compagnie n'ayant pu réunir la totalité des fonds propres nécessaires, fut déchue quelques semaines plus tard à la fin de 1862 **[2]**.

Le gouvernement du Second Empire proposa alors au PLM (La Compagnie des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée) de prendre la suite, en lui faisant valoir que l'Algérie était le prolongement naturel de son territoire métropolitain. En fait, le gouvernement ayant tranché en faveur du PLM dans la lutte qui l'avait opposé au Midi pour la célèbre histoire de la ligne directe Sète-Marseille, il entendait bien obtenir un gage en contrepartie. Aussi, le PLM, qui n'était pas demandeur au départ, finit par accepter en faisant valoir à ses actionnaires que les lignes d'Algérie, très probablement déficitaires, ne pouvaient qu'apporter un supplément de trafic fort substantiel à son réseau métropolitain. En conséquence, dès 1863, le PLM reçut la concession de la ligne Alger-Oran (et non plus seulement de ses deux extrémités à partir d'Alger et d'Oran) et de la ligne Constantine-Philippeville. Les travaux nécessaires furent très longs et, à la chute du Second Empire le 4 septembre 1870, seule la deuxième ligne venait d'être ouverte le 1 er septembre. Sur la première, il manquait encore un

tronçon central de 29 km entre Bou-Medfa et Affreville, section la plus montagneuse comportant entre autres le tunnel dit de l'Atlas qui est avec ses 2312 m, est resté le plus long de l'Algérie. La ligne fut finalement ouverte en totalité le 1er mai 1871, en pleine Commune !

En conclusion, au lendemain de la guerre de 1870, les chemins de fer en Algérie comportaient deux lignes à voie normale exploitées par le PLM : Alger-Oran, soit 421 km, et Constantine-Philippeville, soit 87 km, plus une ligne minière à voie métrique Bône-AïnMokra, soit 32 km **[2].**

I-3-2 : Le développement des chemins de fer en Algérie :

Le développement des chemins de fer en Algérie fut l'œuvre de Napoléon III vivement encouragé par son demi-frère le duc de MORNY. Celui-ci fort intéressé, à tous les sens du terme, par ce nouveau mode de transport fut entre autres postes, Président de l'éphémère Compagnie du Grand-Central et Vice-président de la Compagnie du chemin de fer d'Orléans (Le Paris-Orléans). Le décret impérial du 8 avril 1857 prévoyait la construction :

- d'une ligne principale parallèle à la côte de Constantine à Alger et Oran par ou près Aumale, Sétif, Blidah, Orléansville et Sainte-Barbe-du-Tlélat, soit 881 kilomètres.
- de lignes partant de la ligne principale et aboutissant aux principaux ports :

- Philippeville à Constantine, 87 kilomètres
- Bougie à Sétif, 110 kilomètres
- Bône à Constantine, 202 kilomètres
- Ténès à Orléans-ville, 58 kilomètres
- Oran à Tlemcen par Sainte-Barbe-du-Tlélat et Sidi-Bel-Abbés, 120 kilomètres
- Arzew et Mostaganem à Relizane. 68 kilomètres

Ce plan de développement, le premier des trois qui se succéderont, correspondait sensiblement au projet présenté dès 1833 par Emile PEREIRE soutenu par ses amis saint-simoniens, et financièrement par la famille ROTSCHELD. Pour des raisons économiques et politiques ce projet était alors resté sans suite. (Voir figure **I-1**)

Emile PEREIRE et son frère Isaac jouèrent directement et indirectement un rôle important dans le développement des chemins de fer tant en métropole qu'en Algérie **[2]**.

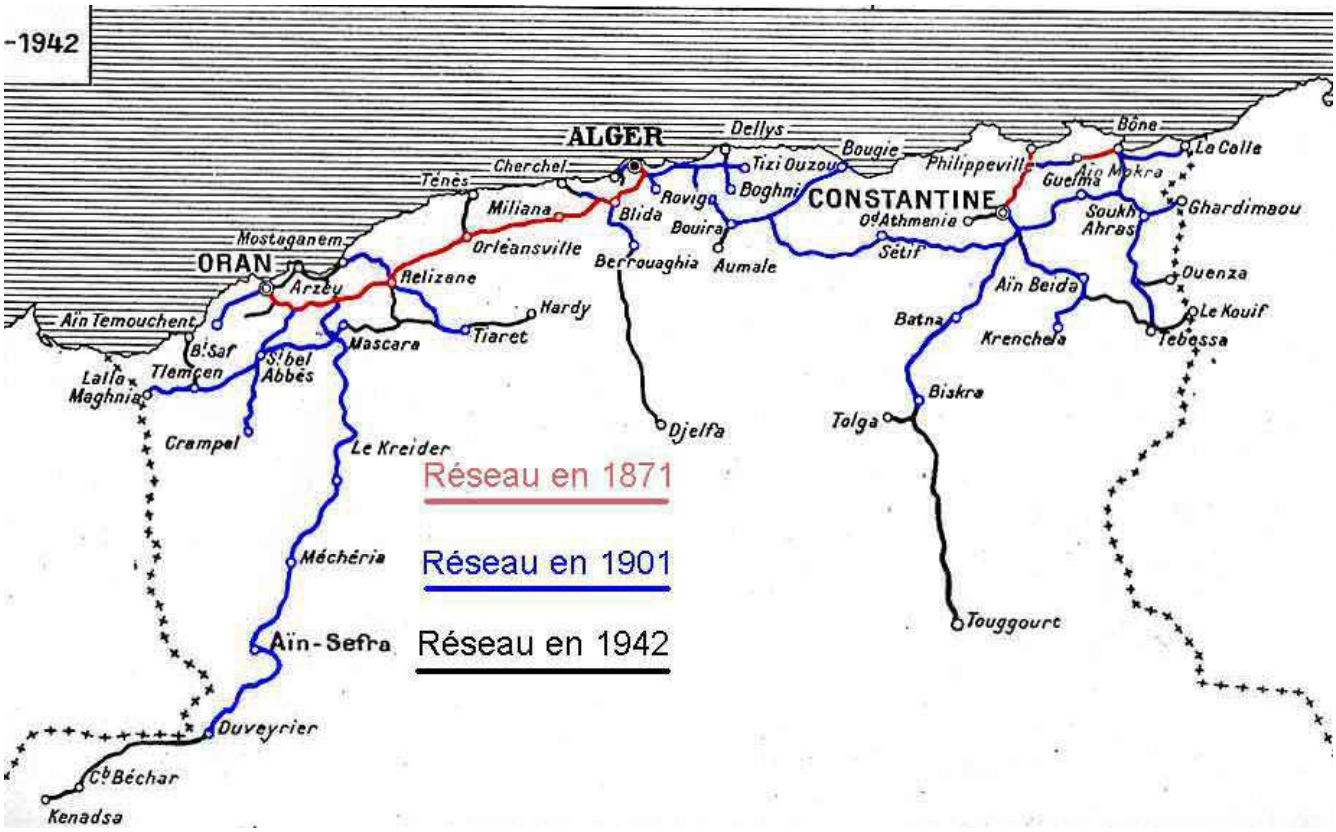


Figure I-1 : Les réseaux ferroviaires en Algérie [2].

I.4. l'infrastructure de la voie ferrée.

Pour les infrastructures linéaires de transport de type ferroviaire, la structure supportant la voie ferrée est un des éléments les plus importants pour assurer :

- La stabilité géométrique de la voie.
- L'amortissement des vibrations importantes provenant du contact Rail- Roue.
- La répartition des charges provenant des traversés d'une manière presque uniforme sur plateforme.
- La contribution à la stabilité longitudinale et transversale de la voie ferrée.
- L'évacuation des eaux de ruissellement par le drainage **[2]**.

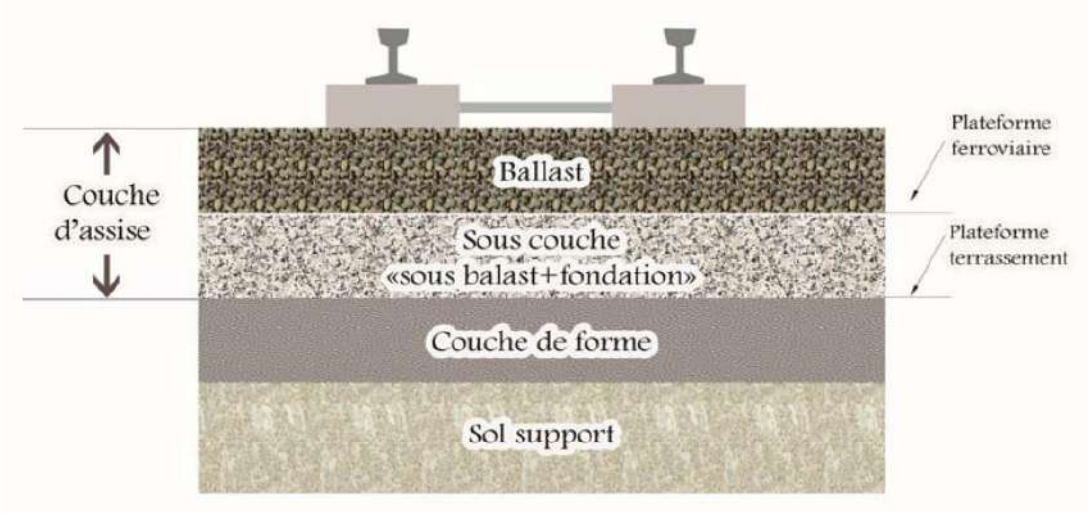


Figure I-2 : Infrastructure de la voie ferrée [3].

I.4.1. Couche de Ballast :

Le ballast est un granulat utilisé dans la construction de voies ferrées et dont 100 % de la surface des grains est entièrement concassée, son rôle est :

- La transmission des efforts engendrés par le passage des trains au sol, sans que celui-ci ne se déforme par tassement.
- Le rôle du ballast est aussi d'enchâsser les traverses afin d'assurer une résistance aux déformations longitudinales, particulièrement importante pour la technique des longs rails soudés.
- Assure en raison de sa granularité particulière le drainage et l'évacuation des eaux superficielles.
- Joue le rôle d'un amortisseur de vibration très efficace grâce à sa propriété rhéologique dissipation de l'énergie de vibration par attrition (contact des éléments) **[3]**.

I.4.2. Sous-couche :

La sous-couche est une couche d'adaptation interposée entre la couche de ballast et la plateforme, La sous-couche peut-être mono ou multicouche. Elle comprend du haut vers le bas, une couche "sous ballast" en grave propre bien gradué (0/31.5) puis une couche de fondation dans le cas de mauvais sol et enfin, s'il y a lieu une couche anti-contaminatrice complété par des feuilles de géotextile ou géo membrane **[3]**

Constituée de :

- **Sous ballast** : constitué de grave propre bien graduée comprise entre 0 et 31.5 mm, permet la transmission et la répartition des charges sur la plateforme.
- **Fondation** : on utilise une couche de fondation si certaines conditions du sol ne sont pas satisfaites, d'une épaisseur minimale de 15 cm.
- **Anti-contaminant** : protéger les sous couches supérieures de la remontée de Particules fines de la plateforme ; Cette couche est éventuelle **[3]**.

Rôle :

Elle a des rôles multiples :

- Amélioration de la portance et meilleure répartition des charges transmises.
- Contribution à l'amélioration des propriétés vibratoires.
- Anticontamination entre la plateforme et la couche de ballast.
- Protection contre l'érosion et le gel.
- Evacuation des eaux de pluies.

I.4.3. Plateforme :

C'est la partie supérieure de l'ouvrage en terre supportant la sous-couche. La plateforme est constituée de terres rapportées dans le cas d'un remblai ou du sol en place dans le cas d'un déblai.

La portance de la plateforme dépend de la qualité du sol constituant « remblai ou déblai », la qualité et l'épaisseur de la couche de forme lorsque cette dernière existe.

On peut distinguer en fonction de ces paramètres trois classes de portance de la plateforme sont les suivants :

- PF1 : plateforme médiocre.
- PF2 : plateforme moyenne.
- PF3 : plateforme bonne .

La plate-forme reçoit les charges transmises par l'intermédiaire du ballast, elle joue un rôle primordial dans la tenue de la voie. En outre, elle draine les eaux de surface pour les écouler à l'extérieur, pour évaluer la qualité de la plateforme **[4]**, il convient :

- D'apprécier la qualité de chaque sol composant la plateforme,
- D'apprécier la qualité de la plateforme complète : couche de forme + sol sous-jacent **[4]**.

I.5 Épaisseur Minimum des Couches d'assises:

La détermination de l'épaisseur minimum par la formule de calcul de l'épaisseur minimal de la couche d'assise est donnée comme suit : E = E+a+b+c+d+f+g **[4]**

E : paramètre qui dépend de la qualité de portance de la plate-forme a, b, c, d, f et g sont des paramètres qui dépend de la classe de voie, de l'armement (type de rails), de l'intensité du trafic de la voie et de vitesse du train **[4]** .

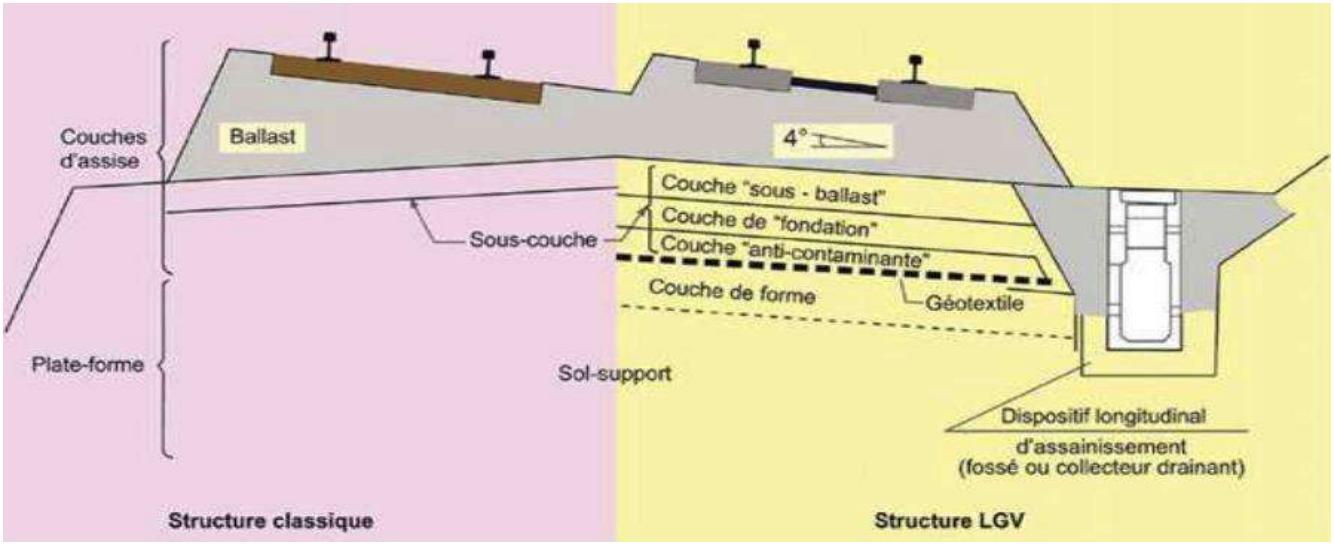


Figure I-3 : Profil en travers d'une voie ferrée [3].

I.6. Superstructure de la voie ferrée.

La superstructure de la voie de chemin de fer est un ensemble d'éléments de nature différente dont les caractéristiques physique et mécanique ne sont pas les même, ces éléments sont essentiellement constitué de : ballast, les travers, les rails et leurs accessoires.

L'exploitation des voies ferrée réclame que certaines voies se coupent et que d'autres puissent communiquer entre elle. Pour cela on met en place des dispositifs connus sous le nom d'appareils de voie, ce sont les branchements et les traversées **[4]** .

I.6.1-Catégories de la voie :

Les voies sont classées en plusieurs grandes catégories, chacune réservé pour un objectif bien précis, on distingue ainsi :

- **les voies principales** : affectées à la circulation des trains.

- **les voies de service** : affectées aux manœuvres, elles sont constituées en général par des anciennes voies principales déclassées.
- **les voies d'évitement** : qui permettent à deux trains qui circulant à contre sens sur une voie unique de se croiser.
- **les voies de garage** : affectées au stationnement du matériel roulant **[6]** .

I.6.2-Les armement de la voie :

I.6.2.1-le rail :

Les rails sont de longues barres d'aciers profilées qui servent principalement à la transmission des charges et permet le roulement et le guidage des véhicules. L'acier utilisé doit avoir de bonnes caractéristiques mécaniques et physiques afin de pouvoir résister aux dégradations et corrosions.

Les deux files de rails maintiennent leur écartement à l'aide des traverses sur lesquelles elles sont fixées et qui reçoivent les charges exercée sur le rail. La masse linéaire du rail varie d'un pays a un autre et qui est en générale estimé à 54 Kg/m. le rail sert également de conducteur électrique soit pour les courants de signalisations ou pour le retour du courant de traction

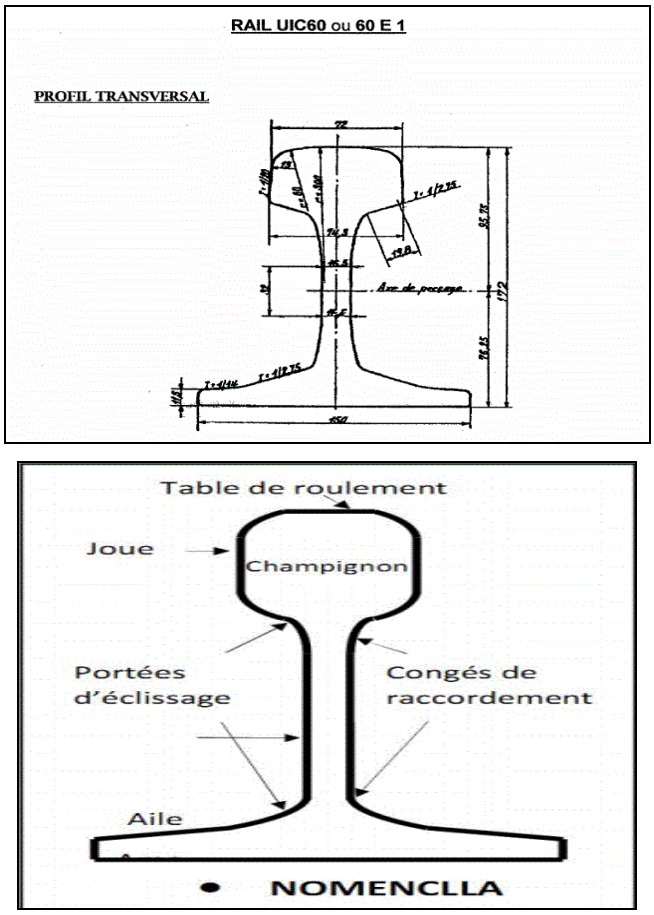


Figure I-4 : le rail UIC 60 [2].

I.6.2-2 Les différents types de rails :

a) Rail Vignole :

Le rail moderne est généralement du type « Vignole » ; dans une section transversale, on distingue le patin qui s'appuie sur la traverse, le champignon qui constitue le chemin de roulement, et l'âme, filet vertical qui relie le champignon au patin. Sur les lignes importantes, la masse linéique standard du rail U54 est de 54 kg/m **[1]**.

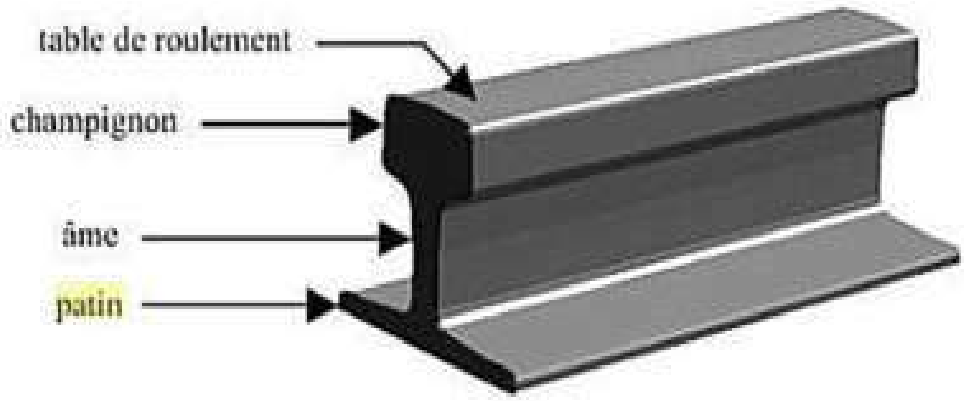


Figure I-5 : le rail Vignole[1].

Le rail Vignole est constitué de 3 parties principales, le champignon, l'âme et le patin

- **Le champignon :** Le profil du bourrelet du rail et celui du bandage de la roue sont étudiés en vue de réaliser les meilleures conditions de roulement et d'assurer le guidage le plus satisfaisant du mentonnet de la roue.
- **L'âme :** L'âme résiste au cisaillement produit par le chargement de la voie.
- **Le patin :** Le patin constitue une sorte de buté contre le renversement du rail suite aux efforts transversaux.

b) Rail gorge :

Des rails à gorge (type « Broca ») sont utilisés pour les voies encastrées dans des chaussées routières, notamment pour les installations industrielles et les lignes de tramway.



Figure I-6 : le rail gorge pour les lignes tramway[1].

c) Rail 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 abimé (poinçonnements dû à l'écrasement au niveau des berceaux). Ce

principe a été abandonné. Des rails type « double champignon asymétrique » ont également été employés : un seul côté, de plus forte section, était utilisé pour le roulement. La simplification apportée par la fixation du rail type Vignole a amené à l'abandon de ce système**[1].**



Figure I-7 : le rail double champignon [1]

I.6.2-3 Assemblage des rails:

• L'éclissage : C'est l'assemblage de deux rails consécutifs à l'aide de deux éclisses qui sont constituées par deux plaques laminées, qui s'entrent entre le dessous du champignon et le dessus de patin. L'éclissage doit satisfaire aux conditions suivantes:

- Relier les rails de façon à ce qu'ils se comportement comme une poutre continue.
- Avoir la même qualité d'acier que le rail.
- Empêcher les mouvements verticaux des extrémités des rails l'une par rapport à l'autre**[4]**

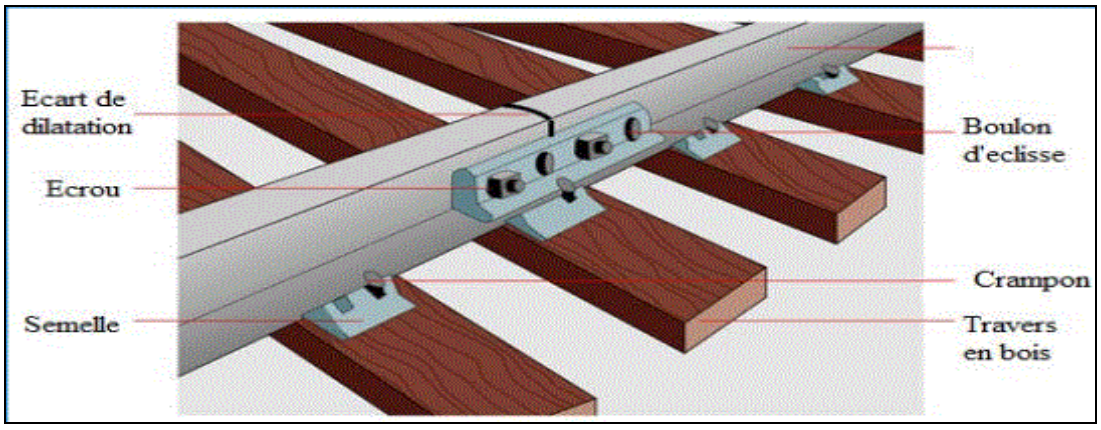


Figure I-8 : l'éclissage [4] .

• **Long Rail Soudé LRS:** Les longs rails soudées (LRS), appelée aussi « barres longues », constituent une méthode moderne de pose des voies ferrées qui présente l'intérêt de supprimer la plupart des joints de rails sur des longueurs importantes, dans cette technique les coupons de rail de 80 m sont soudés en atelier en longueur de 320 à 400 m. ces barres sont posées sur de très grandes longueur, sans limites réelle, les soudures nécessaire sont étant réalisées sur place. Cette méthode est la plus adopté pour toute les lignes a fort trafic, et notamment les lignes à grande vitesse et cela pour les grands avantages qu'elle offre qui se résume essentiellement comme suit :

- une réduction des couts d'entretien de la voie.
- une meilleure qualité de roulement et plus grand confort pour les voyageurs **[4]**.



Figure I-9 : Soudure D'un Appareil De Voie En Pose[10]

I.6.3 Traverse:

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. On utilise principalement des traverses en bois ou en béton (et depuis peu il existe des traverses en plastique dur recyclé) **[2]**.

I.6.3.1 Les rôles des traverses sont :

- Recevoir les forces dynamiques verticales et horizontaux venant des rails et les transmit au couche de ballast.
- Amortir ces efforts dynamiques.

- Garder l'écartement de la file de rails.
- Donner l'inclinaison de rails qui est équivalente à 1/18.

I.6.3.2 Types de traverses :

a) Traverse en bois :

L'avantage et l'inconvénient des traverses en bois :

-Avantage :

- Les traverses en bois sont très élastiques par rapport aux autres types des traverses.
- Elles sont faciles à confectionner.
- Facile à exploiter et à transporter.
- Elles ne coutent pas chère.
- Les traverses en bois à une grande résistance à la rupture, au matage et au cisaillement.

-Inconvénients :

- Elles ont une faible durée de service (de l'ordre de 3 à 5 ans).
- Il faut 80 m3 de bois pour 1km de voies c'est-à-dire destruction des forêts, problème d'environnement.



Figure I-10 : Traverses en bois [11]

b) Traverses en béton armé :

- Avantages :

- Conservation de la nature.
- Peuvent supporter des grandes charges.
- Peuvent résister aux grands efforts et déplacement à cause de leur poids.
- Avoir une longe durée de service (de l'ordre de 40 à 50 ans).

-Inconvénients :

- Moins élastique que le bois.

- Plus fragile.
- Conducteur de courant électrique.
- Plus lourd à manipuler.
- Plus chère.



Figure I-11 : Traverses monobloc et bi-bloc [10].

c) Traverses métallique :

La traverse métallique est un produit industriel de fabrication simple. Elle est constituée d'un laminé en forme de U renversé, embouti à ses extrémités, pour former des bêches qui s'enfoncent dans le ballast et s'opposent au déplacement transversal de la voie. Le rail est fixé au moyen de crapauds qui appuient sur le bord du patin. Ces crapauds sont serrés par des écrous vissés sur des boulons et la combinaison de deux ou trois modèles permet de réaliser une gamme progressive d'écartement de la voie. On peut également adapter des dispositifs élastiques. La traverse métallique, en acier, est relativement légère (80 kg) et est principalement utilisée dans des voies à circulation de moyenne vitesse **[5]**.

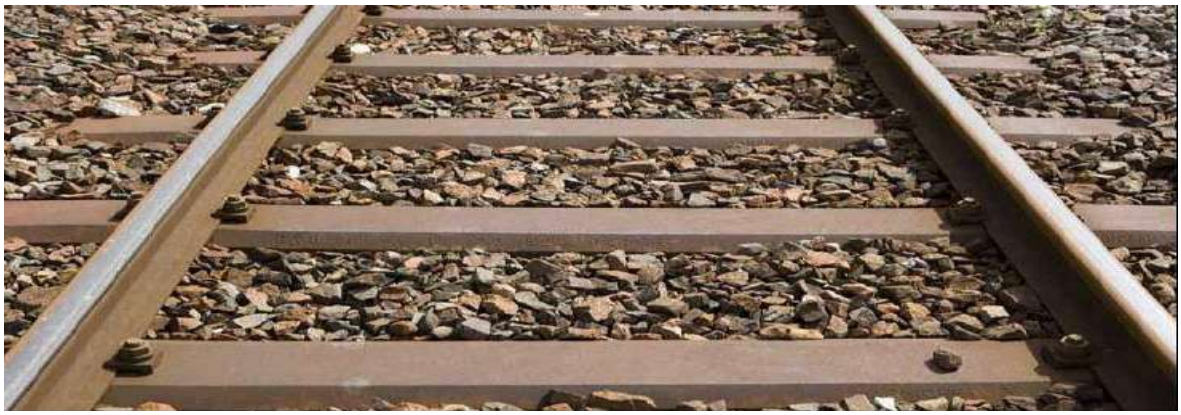


Figure I-12 : Traverses métalliques [12].

d) Traverses plastiques ou composites :

La traverse plastique est habituellement fabriquée à partir d'un recyclât de polyoléfine et renforcée de fibres. Elle est respectueuse de l'environnement. La traverse composite est une alternative à la traverse en bois imprégnée de créosote, l'EU envisageant une restriction sur l'utilisation de la créosote dans les années à venir. La traverse plastique possède d'excellentes caractéristiques mécaniques, supérieures à la traverse en bois. Elle résiste très bien aux intempéries et aux produits chimiques. Elle peut aussi permettre une réduction de nuisance sonore. Plusieurs pays de l'EU ont déjà opté pour cette traverse 100% recyclable. Elle peut être installée en voie standard, en appareil de voie ou encore sur des ouvrages d'art (pont, tablier métallique non-ballasté) **[5]**.



Figure I-13 : Traverses en composites [5].

I.6.4. Travelage :

Le travelage est la façon d'arranger les traverses perpendiculaires aux files des rails ou normalement à l'axe de la voie dans les courbes, ou précisément c'est le nombre de traverses au kilomètre de voie selon le plan de pose.

Un calcul peut se faire pour calculer le nombre de traverse pour un kilomètre de voie et l'espacement entre deux traverses qui se suivent...

D'après les données qu'on a obtenues, Algérie pose 1666 traverses au kilomètre de voie pour l'alignement droit et 1840 au kilomètre dans les courbes. L'espacement entre deux traverses est de 60cm pour les alignements droits et 54cm dans les courbes**[10]**.



Figure I-14 : Travelage [10].

I.6.4 Les Accessoires de pose

On distingue deux type d'accessoires de liaison l'un dans le sens longitudinal et l'autre dans le sens transversal sont :

- La liaison des rails entre' eux soit par les éclisses ou bien par les LRS.
- La liaison Rail-Traverse : les attaches, la semelle **[5]**.

I -6-4-1-La semelle :

Posée entre le rail et la traverse généralement en élastomère «caoutchouc» de 9 mm d'épaisseur à une capacité d'amortissement importante qui peut réduire considérablement les charges exercées sur les traverses **[5]** .

I -6-4-2-Les attaches:

Une attache est un dispositif constitué d'un crapaud qui est maintenu par un écrou accroché dans la traverse, elle sert à fixer le rail sur traverse pour l'empêcher de tout déplacement.

Il existe des attaches rigides comme tirefonds et crampons utilisées pour les traverses en bois, le premier type serre mal le patin, le rail alors peut se relever de la traverse, le deuxième est tellement rigide, que le rail peut soulever la traverse en se redressant, pour les traverses métalliques, il s'agit des boulons qui fixent les crapauds sur le patin. Des attache élastiques « de types nabla, E-clip etc. » convient aux longs rails soudés sur les traverses en béton sont les plus utilisées, ils peuvent résister d'une manière élastique aux mouvements verticaux, surtout vers le haut, ces déplacements se font sans jeu, sans chocs **[5]** .

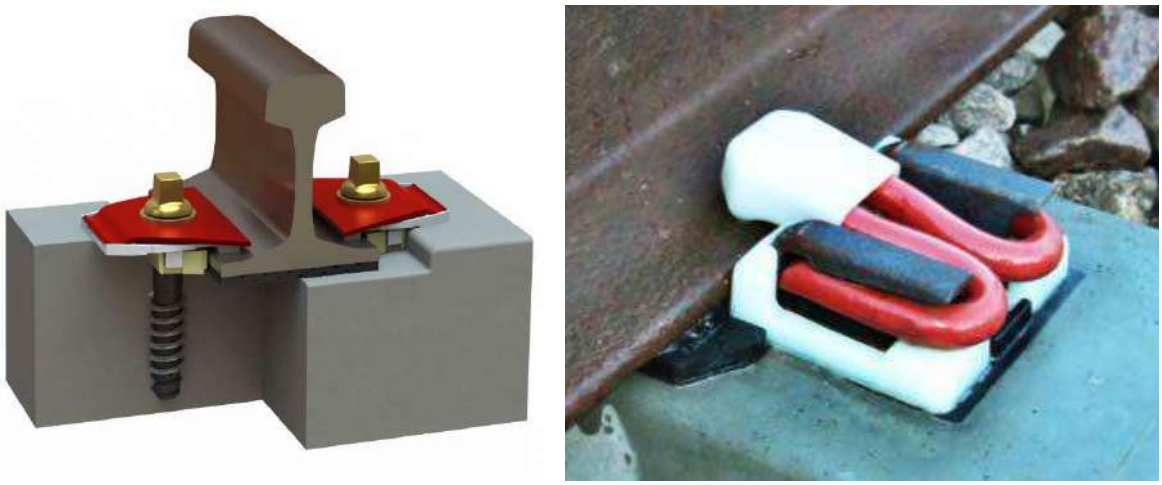


Figure I-15 : Attache élastique Nabla et Attache élastique E-Clip [13]

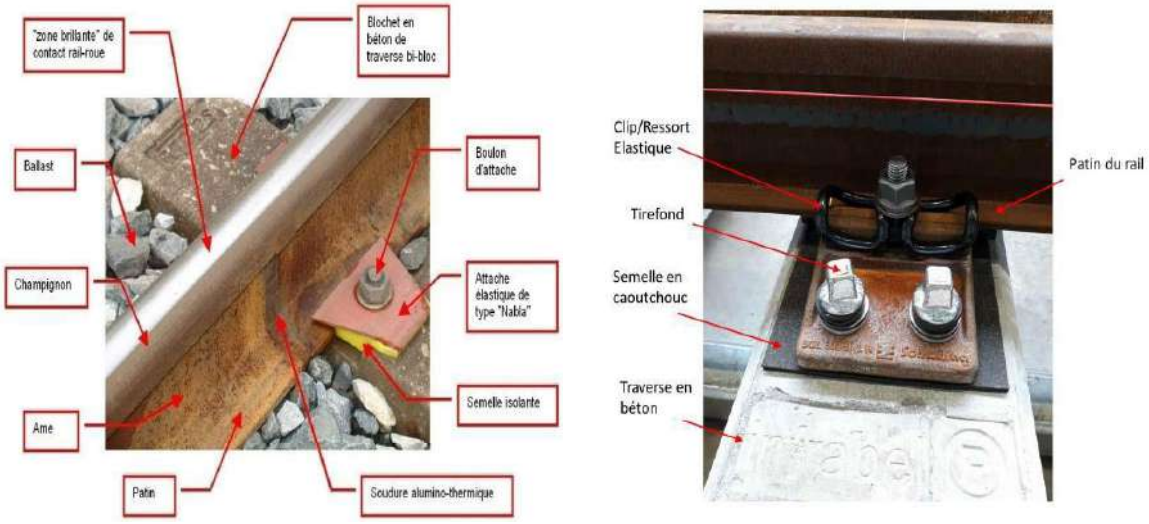


Figure I-16 : Liaison rail-traverse [14]

I.6.5 Le ballast:

Les pressions résultant du matériel roulant sur la voie sont transmis et répartie sur le sol naturel par l'intermédiaire d'une couche sous un nom générale de « ballast », Le ballast constitue un élément support de la voie et fait partie de la superstructure, il est constitué de concassés de pierres dures de calibre 22.4/63 mm provenant de carrières agrées par le maitre d'ouvrage pour l'exécution des projets présentant une DRG au moins égale à 12, propre et dont 95% des pierres possèdent au moins deux faces fracturées.

Une épaisseur de 30 cm sous traverse sera mise en place en voie courante et 35 cm en tunnels et sur viaducs. il provient de concassage de roches dures (granite, quartzite, grès, gneiss, etc. …) avec le rôle de :

- Transmettre et repartir les efforts à la plateforme dus aux charges statiques et dynamiques des circulations.
- Absorber les vibrations mécaniques et acoustiques ;
- Contenir grâce à la résistance au cisaillement les efforts latéraux (circulation en courbe, flambage consécutif de la dilatation des Longs Rails Soudes) et longitudinaux
- (Accélération, freinage).
- Drainer les eaux pluviales.
- Protéger le sol support vis-à-vis du gel.
- À ralentir l'invasion de la végétation entre les voies **[10]**.



Figure I-17 : Le ballast [10].

I.6.6. Les appareils de voie

L'exploitation des voies ferrées exige des dispositifs de liaison et d'intersection des itinéraires, que l'on désigne sous le terme générale d'appareils de voie.

Un appareil de voie est un élément de la voie ferrée qui permet d'assurer le support et le guidage du matériel roulant ferroviaire sur un itinéraire donné.

Les appareils de voie permettent aux véhicules de passer d'une voie à l'autre sans interrompre leur circulation.

En règle générale le terme « appareil de voie » couvre à la fois les aiguillages, les croisements et les traversées-jonctions.

Actuellement, la durée de vie des appareils de voie est d'environ 20 (avec traverses en bois) à 30 ans (avec traverse en béton) **[7]**.



Figure I-18 : appareils de voie [15]

I.6.6.1. Type d'appareils de voie:

a) Branchement simple (Aiguillage simple) :

Dans le cas de l'aiguillage simple, une autre voie (voie déviée) pat de la voie en alignement. Si on regarde de la pointe de l'aiguille en direction de la pointe du cœur de croisement, on peut faire la distinction entre le branchement simple à gauche et le branchement simple à droite.

Le branchement simple se décompose de trois parties générales :

1. L'aiguillage
2. Les voies intermédiaires,
3. Le croisement **[5]**

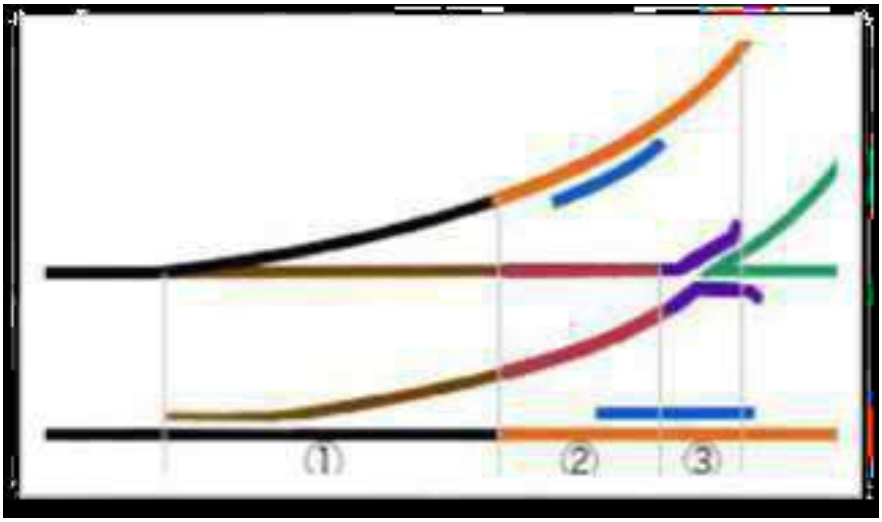


Figure I-19 : Branchement simple [5]

b) Branchement double : Dans le cas du branchement double, deux autres voies (voir la figure I-20.) partent de la voie en alignement (voie directe). Le premier sens de bifurcation est déterminant pour la désignation « à gauche » ou « à droite » **[5]**.

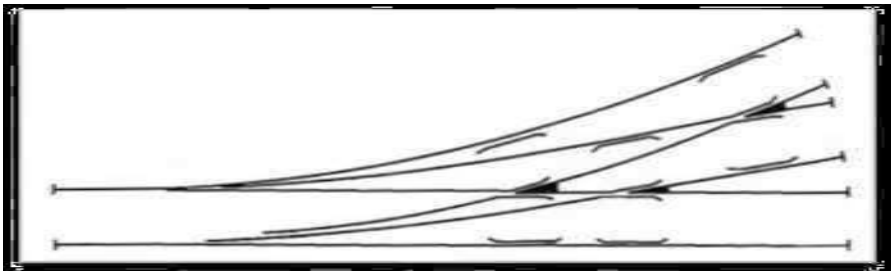


Figure I-20: Branchement double[5].

c) Branchement Junction double :

Qui permet la traverse d'une voie par une autre voie la sécurité du guidage des roués et assure par les contre rails, places à l'intérieur et oppose au droit de chacune des lacunes créées des ornières au passage des bougies des roués**[5]**.



Figure I-21: Branchement Junction double [13]

I.7. Ouvrage d'art

D'une façon générale, on appelle un pont tout ouvrage permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou une autre voie de circulation. Selon le cas, on distingue : pont-rail pont- route, pont canal (ponceau).

En résumé, on appellera pont tout ouvrage de franchissement en élévation construit in situ, ce qui exclut les buses totalement ou partiellement préfabriquées. **[9]**



Figure I-22: PRA Pont-rail [16]

I.7.1 Recommandation sur le choix du type d'ouvrage:

1. dans le cas ou la voie ferrée croise la route en un endroit où l'écart entre leur niveau respectif n'est pas important, ou bien qu'à cet endroit la voie ferrée passe en déblai par rapport à la route, il est évident alors de prévoir un passage supérieur routier c.à.d. un ouvrage d'art routier dont les gabarit UIC permettent le passage d'un ou plusieurs trains en même temps selon la nature de la ligne (la ligne à voie unique, à double voies, ou à plus).

2. par contre si ce croisement se fait en un endroit ou la voie ferrée passe en très grand remblai par rapport à la route, de telle façon à pouvoir insérer un gabarit routier entre leur niveau de roulement et cela sans oublier les retombées des poutres de l'ouvrage d'art (1.20m). Alors dans ce cas, c'est la voie ferrée qui sera en passage supérieur, c.à.d. qu'il faudra prévoir un ouvrage d'art ferroviaire. Afin d'analyser cas par cas tous les croisements précédents, il est important de connaître d'abord la nature et le débit de chaque voie traversière afin d'analyser cas par cas tous les croissements en fonction de la vitesse de base maximale le long du tracé ferroviaire :

si cette vitesse est supérieure à 100 km/h aucun passage à niveau n'est toléré sauf pour les pistes en débit presque nul et seulement si la topographie du terrain le permet sinon pour toute les autres classes de route un ouvrage est à prévoir, Comme indique si dessus **[9]**.

si cette vitesse est inférieure à 100 km/h, en plus des pistes on peut admettre un passage à niveau pour les chemins à débit presque nul (même condition (même condition topographique) **[9].**

I.8 Ouvrages hydrauliques.

Le système de drainage sera composé de caniveaux, fossés (drainage longitudinale de la ligne), conduits, puits et tout ce qui est nécessaire pour garantir un drainage correct de la

plate-forme ferroviaire et l'écoulement des eaux du réseau hydrographique de surface. Dans notre cas, un Dalot ou buse est un ponceau qui est une structure hydraulique de drainage réalisée sous un remblai qui permet le passage de l'eau et les petits ruisseaux, pour assurer la continuité de la voie ferrée **[10]**.

A Dalot :

Le dalot, en génie civil, désigne un canal en béton armé recouvert d'une dalle, un élément de caniveau ou un ouvrage hydraulique rectangulaire, il est placé sous les remblais surélevés des routes ou des voies ferrées. Les travaux de terrassements routiers ou ferroviaires, ont généralisé ces équipements permettant l'écoulement des eaux .

B Buses :

L'ouvrage est constitué d'au moins un conduit de forme circulaire ou ovale, généralement fait en **CAO** sont en béton Centrifugé Armé Ordinaire, les buses sont caractérisées par la résistance mécanique à la rupture 90A 135A 165A, de métal ou de PVC laissant circuler l'eau sous une route, une voie ferrée ou toute autre structure. Dans cette application, une buse est une solution économique pour le drainage des eaux de ruissellement afin de protéger les remblais contre l'érosion et par la suite la dégradation de la structure par les eaux de pluies **[10]**.



Figure I-23: Ouvrages de drainage (buses et dalots) [1]

C Drainage longitudinal de la voie ferrée :

Le réseau longitudinal de section rectangulaire, triangulaire ou trapézoïdale, permettra de collecter les eaux ruisselant transversalement en vue de sécuriser la plateforme-ferroviaire

afin de limiter le risque d'inondation de la voie ferrée et d'éviter par conséquent le risque d'érosion de sols situés au dessous de la voie **[10]**.



Figure I-24: Drainage longitudinale de la voie ferrée Tiaret-Saida PK 108

I.9 Electrification de la voie ferrée.

La traction électrique a toujours été un choix populaire pour les réseaux ferroviaires de transport collectif. Plus récemment, cette technologie prend de l'importance au sein des systèmes de transport en commun, en raison des préoccupations grandissantes envers le réchauffement planétaire et la durabilité de l'environnement **[5]**.

I.9.1. Les avantages d'électrification

- Rendement élevé du moteur électrique avec possibilité de surcharge temporaire.
- Augmentation des charges remorquées et de la vitesse.
- Aptitude particulière pour le trafic banlieue (accélération et souplesse d'exploitation).
- Conditions de travail moins pénibles pour le personnel de conduite et de maintenance.
- Absence de nuisance pour les voyageurs et les riverains **[5]**.

I.9.2. Les inconvénients d'électrification

- Infrastructure importante de postes et lignes caténaires.
- Cout important **[5]**.

I.9.3 Type d'électrification

Elle existe deux types d'électrification ces sont :

- Electrification en 3000 V CC (courant continu).
- Electrification en 25 KV CA (courant alternatif).

I.10 Signalisation :

La signalisation ferroviaire est un système d'informations destiné à renseigner le conducteur d'une circulation ferroviaire lui donnant, sous forme de codes réalisés par des signaux de forme, de combinaisons, ou de couleur diverse, dont la signification est prédéfinie, disposés le long des voies ou en cabine, toutes les informations qui lui sont nécessaires afin de régler la marche de son convoi et rouler en toute sécurité**[2]**.

I.10.1. Les principaux risques ferroviaires

Ces sont au nombre cinq :

1) Collision nez à nez.
2) Collision par rattrapage.
3) La prise en écharpe.
4) La collision avec un obstacle.
5) Le déraillement **[2]**.

I.10.2. Principe de base

La signalisation doit satisfaire aux principes de base suivants :

- Assurer la commande des itinéraires pour que les trains arrivent à leur destination
  prévue.
- Assurer la sécurité de chaque mouvement de trains en empêchant toute collision ou
  déraillement.
- Assurer les performances spécifie en termes d'écoulement du trafic et de performances
  à atteindre**[2]**.

I.10.3. Type de signalisation

- **Signalisation mécanique :** il est fait usage de signaux réalisés au moyen d'une aile ou
  d'une cocarde de couleur.
- **Signalisation lumineuse :** il est fait usage de panneaux portant un ou plusieurs feux de

couleur, généralement disposés sur un écran noir bordé d'un liseré blanc déforme oblongue ou circulaire.

Qu'elle soit mécanique ou lumineuse, la signalisation peut comporter en outre :

- Des tableaux lumineux,
- Des tableaux mécaniques fixes ou effaçables,
- Des tableaux ou pancartes réflectorisés,
- Des guidons d'arrêt.

Exceptionnellement à certains signaux amovibles par nature (signaux à main), les signaux sont implantés à demeure soit à titre permanent, soit à titre temporaire (signaux de chantier…).

Les signaux implantés à demeure sont dits :

Fixes, lorsqu'ils présentent un aspect invariable.

Mobiles, lorsqu'ils présentent aux moins un aspect distinct **[2]**.

I.10.4. Différentes fonctions des signaux

Les signaux sont essentiellement utilisés pour assurer les fonctions suivantes :

- Signalisation d'arrêt.
- Signalisation de limitation de vitesse.
- Signalisation de direction.

Chacune de ces fonctions comprend habituellement une signalisation d'annonce et une signalisation d'exécution ou de rappel **[2]**.

I.10.5 Système de contrôle de la signalisation

Application au projet

Dans la nouvelle ligne Saida/ El Bayadh Le type de système de signalisation choisi par le maitre d'ouvrage est ERTMS/ETCS Niveau 1 (European Rail Traffic Management System/European Train Control System) pour contrôler et surveiller la sécurité de la circulation des trains**[8]**.

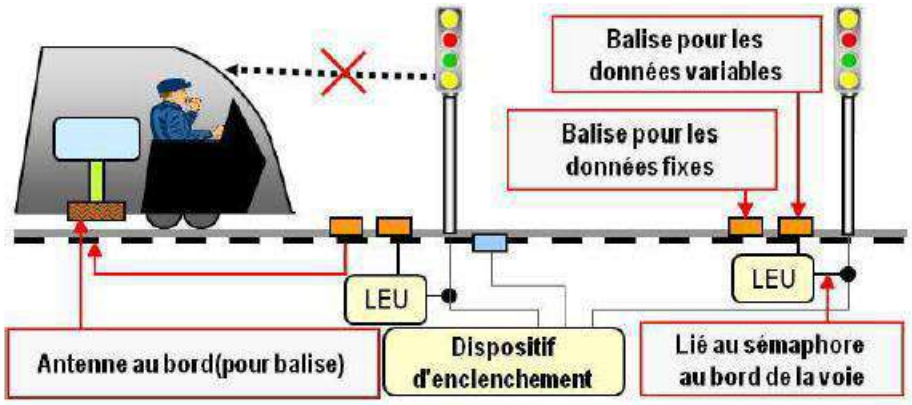


Figure I-28: Le système européen de contrôle de la signalisation (ERTMS) niveau 1[8]

I.7.6. Transmission sol-machine (Les équipements au sol)

Ce niveau utilise une transmission ponctuelle à l'aide de balises placées au pied des signaux et en amont. Ces balises (euro-balises) communiquent les données de signalisation au train.

Le système de transmission ponctuel est constitué de la façon suivante :

***Balise :**

La balise est un appareil destiné à transmettre les télégrammes au sous-système du sol. Elle offre les informations fixes et celles modifiables en cas de connexion à l'unité électronique de voie et assure la transmission des messages en liaison montante et entre les systèmes au sol et au train **[7]**.

***Un codeur appelé LINE–SIDE ELECTRONIC UNIT (LEU) :**

LEU est composé du tableau d'entrée de signaux, de l'appareil de transmission d'informations, du tableau de commande (drive board) de la balise pour la transmission des informations et du tableau électrique assurant l'alimentation électrique du système**[7]**.

Le tableau d'entrée de signaux et le tableau de commande de la balise sont capables de déterminer et d'afficher les signaux appropriés selon les conditions de l'appareil de signalisation et facilement extensibles en fonctions des conditions de signalisation comme le choix de l'itinéraire [**7]**.

***Euro Loop :**

Elle offre à l'avance les informations relatives à la signalisation au signal principal (prochaine signalisation latérale) en amont dans le sens de la marche du train. Euroloop est constituée d'une fonction embarquée à bord et de plusieurs fonctions au sol.

I.11 Gare

Une gare est un lieu d'arrêt de trains ou on peut y affecter des manœuvres d'échanges de machine, elle a des fonctions multiples : permettre la montée et la descente des voyageurs, ou le chargement et le déchargement des marchandises et se présente aussi comme un nœud de liaison entre la ville et son système de transport public**[2]**.

I.11.1 Type des gares

On distingue plusieurs types des gares :

- Gare de voyageurs.
- Gare de marchandises Ferroviaire.
- Gare mixte.
- Gare de triage **[2]**.

I.11.2 Installations d'une gare voyageuse.

- **Le bâtiment de voyageurs :** est un espace destiné à l'accueil des voyageurs, il comporte un hall des guichets (ou espace de vente) ainsi qu'une ou plusieurs salles d'attente.
- **Les bâtiments à usages divers (B.U.D) :** c'est un espace réservé aux agents de chemins de fer.
- **Quais :** une bande parallèle à la voie et permettant aux passagers d'accéder aux voitures de la rame.
- **Abris de quais :** c'est une installation sur le quai pour protéger les voyageurs des intempéries.
- **Les passages sous terrain et les passerelles :** ils sont construits dans les gares pour permettre aux voyageurs le passage d'un quai à l'autre quai en pleine sécurité **[2]**.

I.11.3. Caractéristiques géométriques de la gare

I.11.3.1. Garage franc

Une borne de garage franc est un signal qui indique la limite de stationnement permis du train à la voie de croisement. Théoriquement on pose ce signal à 3,57 m entre les deux voies. Compte tenu de la sécurité, il vaut mieux le poser un mètre plus loin par rapport à la position théorique.

Le garage franc est implanté par rapport au cœur de l'appareil de voie à une distance de : **GF= 3.57*n+1** (1m pour sécurité) **; n :** varie selon l'ouverture **[2]**

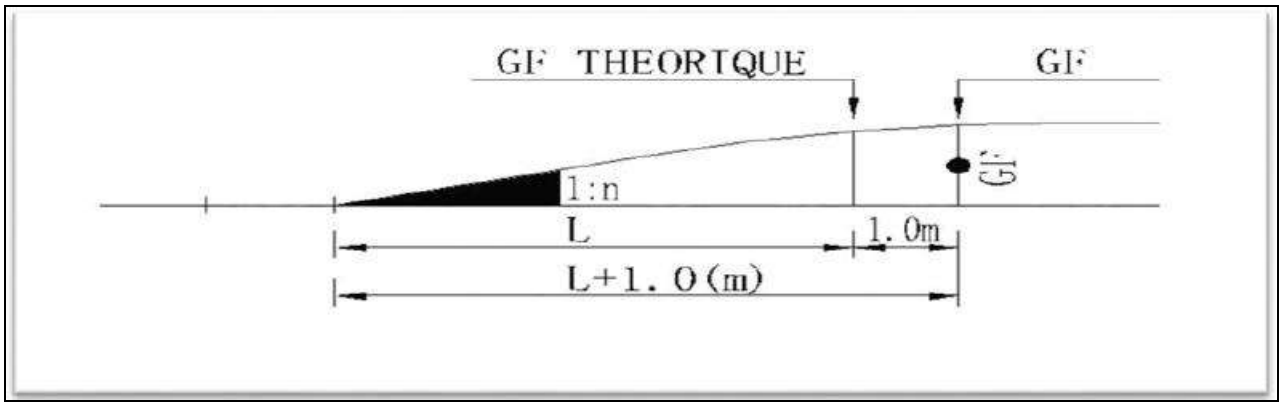


Figure I-29 : Garage franc [2]

I.11.3.2. La longueur utile d'une voie de stationnement

C'est la longueur nécessaire permettant au train de se stationner sur la voie de dépassement sans gêner la circulation sur la voie principale ou les autres voies de dépassement voisines.
La longueur utile est la distance séparant deux garages francs. Selon la SNTF La longueur utile minimale est de :

- 426 m : pour les trains voyageurs.
- 870 m pour les trains de marchandise (pour la voie principale et la voie de service) **[2]**.

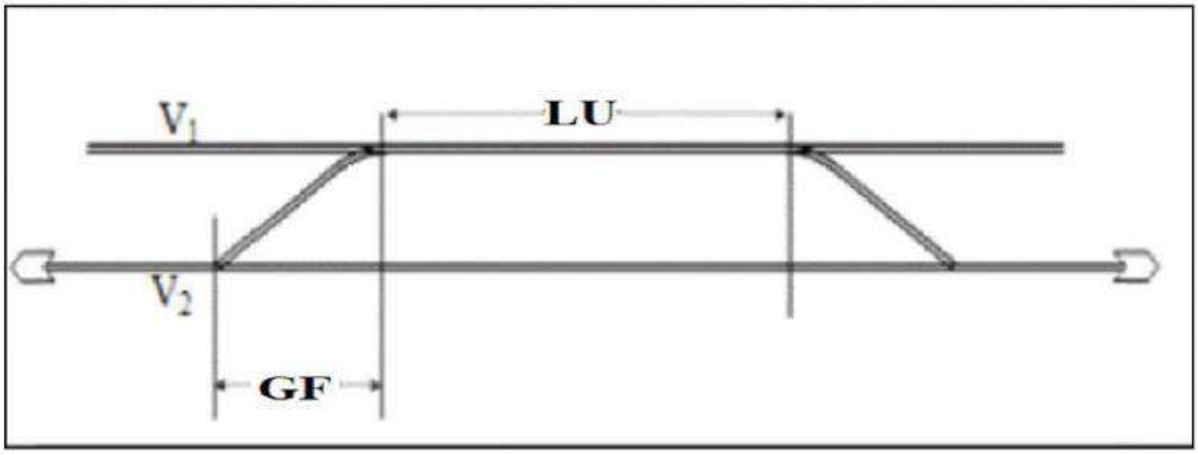


Figure I-30: La longueur utile de stationnement et garage franc[2]

I.11.4 Les heurtoirs

Matérialise la fin d'une voie de garage ou de sécurité. Les heurtoirs sont placés aux extrémités des voies pour éviter que les véhicules en mouvement continuent leur chemin en dehors de la voie, conçue pour absorber l'énergie cinétique des trains qui les heurtent par l'intermédiaire des tampons**[2]**.

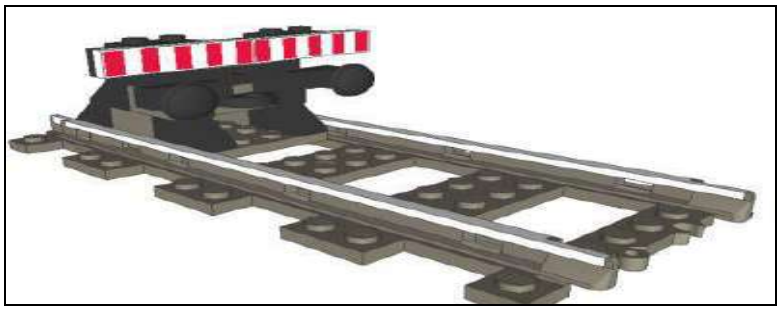


Figure I-31: Un heurtoir[2]

I.12. Quai

I.12.1. La hauteur du quai

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

- Plus grand que 760 mm - quais dits hauts.
- Plus petit que 550 mm - quais dits bas**[2]**.

I.12.1.2 Entraxe entre les quais

Selon SNTF :

- Entraxe normal > 11.3 m.
- Entraxe minimal > 9.3 m**[2]** .

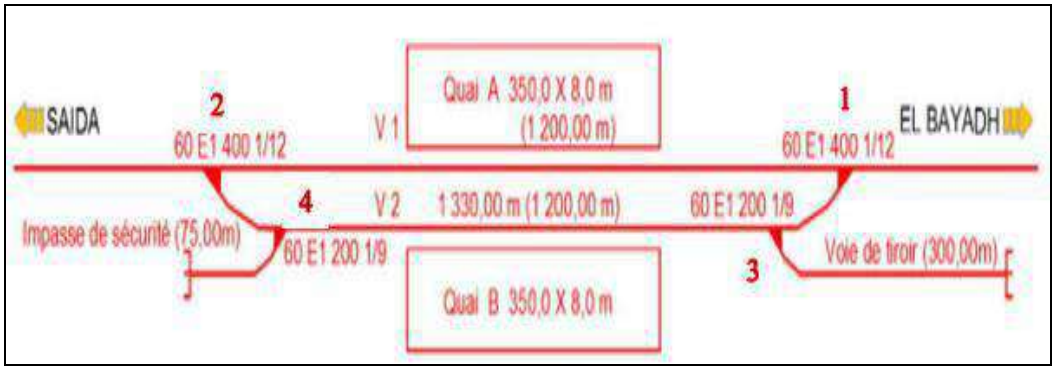


Figure I-32 : Schéma de la gare de Sidi Ahmed W.Saida [10].

I.12.2 Assainissement de la gare

I.12.2.1. Assainissement transversal

Pour faciliter le ruissellement des eaux pluviales dans les gares, les quais doivent avoir une pente de 2% en toit ou en V selon le cas de telle sorte à évacuer ces eaux vers les voies ensuite ces eaux sont évacuées grâce aux pentes transversales des plates-formes**[4]**.

I.12.2.3. Assainissement longitudinal

Les drains disposés longitudinalement avec des pentes de 4%, permettent de recueillir les eaux de ruissellement qui s'infiltrent dans le ballast et la plate-forme et les évacuer vers le réseau d'assainissement via les regards de visite**[4]**.

I.13. Caractéristiques géométriques d'une ligne ferroviaire.

I.13.1 Tracé en plan :

Le tracé en plan d'une ligne de chemin de fer est l'un des trois éléments essentiels qui permettent de caractériser la géométrie d'une voie ferrée, il se caractérise par une succession de courbes et d'alignements qui représentent la projection horizontale sur un repère cartésien topographique de l'axe de la voie **[4]**.

I.13.2 Règles à respecter dans le tracé en plan

- L'adaptation du tracé en plan avec le terrain naturel afin d'éviter les terrassements importants
- Eviter les zones agricoles et les forets
- Eviter les propriétés privées
- Eviter les oueds pour minimiser les ouvrages d'arts
- Essayer d'utiliser le maximum des alignements.
- Utiliser des grands rayons pour les arcs.
- Se raccorder au réseau existant **[4]**

I.13.3Éléments de trace en plan

I.13.3.1 Les alignements

Pour assurer les meilleures conditions de confort et de sécurité il est recommandé d'utiliser le plus possible d'alignements dans le tracé en plan quand la topographie de la zone nous permet.

Selon le référentiel SNTF les longueurs minimales des alignements sont **[4]**:

Tableau I.1 : longueurs minimales des alignements.[4]

Valeur minimale normale(m)	V/2=110
Valeur minimale exceptionnelle(m)	V/3=73.34 (en prend 75 m)

I.13.3.2 Les raccordements circulaire

Le raccordement entre les alignements se fait avec les raccordements circulaires en respectant des valeurs minimales pour les rayons.

Ces valeurs des rayons sont limitées afin d'assurer le confort des usagers et la sécurité et minimiser les efforts latéraux sur la voie.

Selon le référentiel SNTF on détermine les rayons comme suit :

- Pour la vitesse minimale de circulation des trains lents, l'excès de dévers E devra être inférieur à la valeur maximum admissible.
- Pour la vitesse maximale de circulation des trains rapides, l'insuffisance de dévers I devra être inférieure à la valeur maximale admissible**[4]**.

I.13.3.3 Les raccordements progressifs

Le raccordement entre l'alignement droit et le cercle doit être fait avec des courbes de raccordement progressives (la clothoïde), ce type de raccordement permettre d'introduire progressivement le devers dans le but respecter les conditions du confort et de sécurité**[4]**.

I.13.3.4 Longueur de raccordement

C'est la longueur du clothoïde qui permettre le raccordement d'alignement avec la courbe circulaire en respectant les conditions sur les devers. **. [4]**

I.13.3.5 Les devers

Le devers est la différence d'altitudes entre les deux files de rail qui composent la voie.

I.13.3.6 Le devers théorique

Pour une vitesse V du train on établit un dévers tel que la résultante du poids du véhicule et de la force centrifuge est perpendiculaire au plan de roulement, dans ce cas l'accélération transversale est entièrement compensée. L'action de l'accélération transversale peut conduire au déraillement du train, la fatigue de la voie et du matériel roulant.

I.13.3.7 L'excès et l'insuffisance

Les voies mixtes doivent permettre la circulation des trains rapide et les trains lents en respectant les conditions de confort et de sécurité**[4]**.

I.13.3.8 Le devers pratique

Le dévers réel appliqué aux sur la voie est limité à une valeur inferieur à la valeur théorique ce qui donne une insuffisance de dévers pour les trains les plus rapides, et un excès de dévers pour les trains lents**[5]**.

I.13.3.9 Calcule de l'axe

Le calcul d'axe consiste à déterminer tous les points de l'axe, en exprimant leurs coordonnées ou directions dans un repère fixe. Ce calcul se fait à partir d'un point fixe dont on connaît ses coordonnées, et il doit suivre les étapes suivantes :Calcul de l'angle γ , Calcul de l'angle τ, Calcul de la tangente T, Calcul de la corde SL, Vérification de non chevauchement, Calcul de l'angle polaire σ, Calcul de α, Calcul de La longueur de l'arc, Calcul des coordonnées des points singuliers et le Calcul de gisements**[4]**

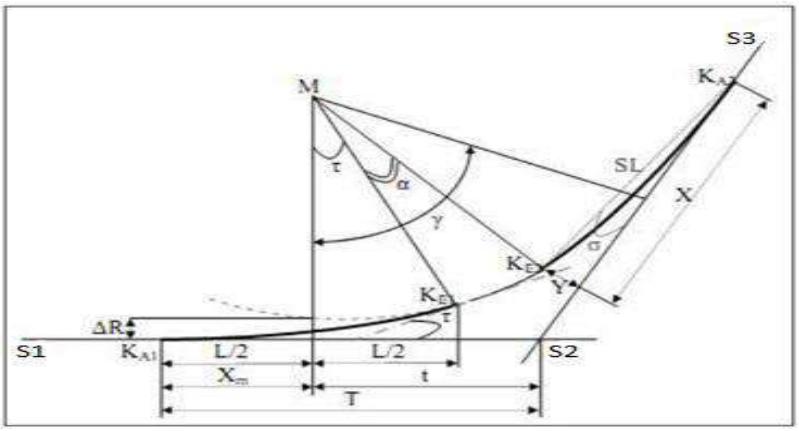


Figure I-33 : éléments du raccordement circulaire avec clothoïde[4]

I.14 Profil en long

Le profil en long de la voie est constitué de pentes uniformes reliées entre elles par des courbes circulaires. Le profil longitudinal sera défini par la projection horizontale de la cote des points P, correspond au-dessus de là sous couche des voies sur un plan vertical passant par l'axe du tracé.

Pour chaque point du profil en long, on doit déterminer les éléments suivants :

- Les points kilométriques PK et distances cumulées.
- La côte du point P.
- La côte du terrain naturel TN
- La valeur du remblai ou déblai.
- Les éléments du tracé en plan.
- Pentes, Rampes et courbes verticales.
- Les ouvrages d'art et les ouvrages hydraulique.
- La position des appareils de voie des voies de raccordement, gares **[4]**.

I.14.1 Elément géométrique de profil en long

- Pente : tronçon de voie où l'altitude est décroissante dans le sens de circulation (descente).
- Rampe : tronçon de voie où l'altitude est croissante dans le sens de circulation (montée).
- Palier : c'est la partie de la ligne rouge qui se trouve en horizontale.

- Courbes de raccordement verticales : ce sont des arcs de cercles qui assurent la liaison entre les éléments de la ligne rouge**[4]**.

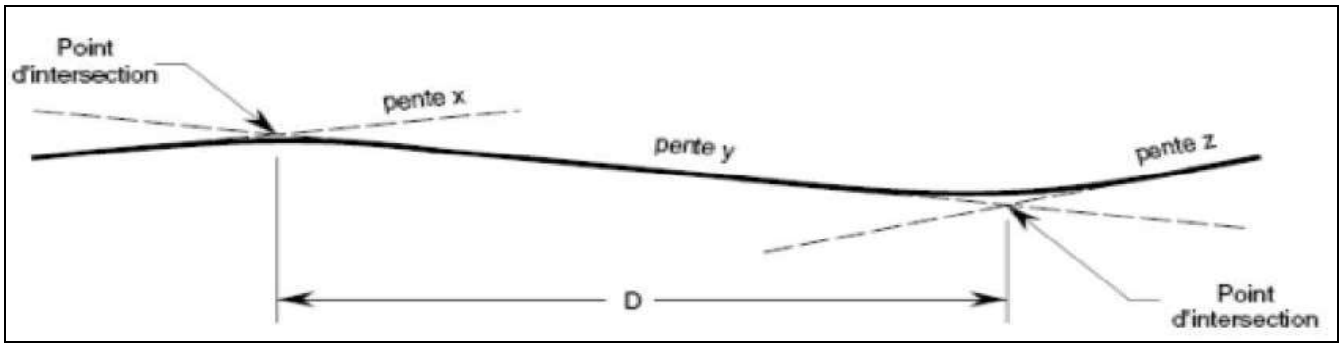


Figure I-34 : Eléments géométriques du profil en long [4].

I.14.2Déclivité maximale

La déclivité (rampe et pente) d'une ligne affecte les possibilités de freinage et de démarrage et pour éviter ces deux problématiques il est nécessaire de déterminer des valeurs de pentes et de rampes limites maximales à appliquer sachant que la déclivité admise varie en fonction de sa longueur selon le référentiel technique de la SNTF qui stipule :

- La déclivité de longueur inférieure à 3000 m, ne doit pas dépasser 16‰ et exceptionnellement 18‰.
- La déclivité de longueur comprise entre 3 000 m et 15 000 m, diminue graduellement pour passer de 16‰ à 13‰, exceptionnellement de 18‰ à 15‰.
- La déclivité de longueur supérieure à 15 000 m, ne doit pas dépasser 13‰ et exceptionnellement 15‰.**[4]**

I.14.3 Règle a respect dans le trace du profil en long

Pour faire un bon tracé de projet on doit tenir en compte plusieurs conditions :

- Assurer la distance entre deux points de changement de déclivité (Distance minimale).
- Respecter les valeurs des rayons préconisés par les règlements.
- Eviter les angles rentrants en déblai, car il faut éviter la stagnation des eaux et assurer leur écoulement.
- Un profil en long en léger remblai est préférable à un profil en long en léger déblai, qui

complique l'évacuation des eaux et isole la voie ferrée du paysage.

- Rechercher un équilibre entre le volume des remblais et les volumes des déblais.
- Eviter une hauteur excessive en remblai.
- Adapter le profil en long aux grandes lignes du paysage.
- Respecter les pentes nulles dans les gares, zones neutres.
- Dans les zones inondables, il est obligatoire de passer avec un profil en remblais dont

  la hauteur est supérieure à NPHE + 0.5m. **[4]**

I.15 Profil en travers

Le profil en travers est une coupe transversale, menée selon un plan vertical perpendiculaire à l'axe de la voie projetée, il nous renseigne sur les éléments de la superstructure et de l'infrastructure, sur les valeurs des pentes des talus sur le mode d'assainissement et sur les systèmes éventuels de protection de la voie (ensablement et éboulement).

Pour les profils en travers, on a adopté le plus souvent une échelle de 1/100 c'est à dire un centimètre pour un mètre (on garde la même échelle en hauteur et en longueur pour conserver les vraies pentes au talus). **[4]**

On distingue deux types de profil :

I.15.1 Les déférents types de profil en travers

Il existe deux types de profil en travers qui sont **[4]** :

I.15.2 Profil en travers type

Contenant toutes les dimensions et tous les détails constructifs (largeurs de voie, pentes des surfaces et talus, dimensions de l'infrastructure et de la superstructure, système d'évacuation des eaux etc.…).

I.15.3 Profil en travers courant

S'applique au PK indiqué, prend et mentionne toutes les données caractérisant la section transversale de la voie au PK considéré, notamment la cote du terrain naturel, la cote de projet et le dévers de la plateforme.

I.15.4 Les éléments du profil en travers

a- La plateforme

Il est conseillé de réaliser une plateforme à partir d'une succession des couches des matériaux parfaitement compactés, sur laquelle reposera la voie, à savoir : les rails, les traverses le ballast ainsi que le train lui-même.

La plate-forme reçoit les charges transmises par l'intermédiaire du ballast, elle joue un rôle primordial dans la tenue de la voie. En outre, elle draine les eaux de surface pour les écouler à l'extérieur**[4]**.

b- L'Emprise

C'est la surface du terrain naturel affecté à la voie ; limitée par le domaine public.

c- Assiette

C'est la surface de la voie délimitée par les terrassements.

d- La voie

C'est la partie de la voie ferrée affectée à la circulation des trains.

e- 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.

f- Le fossé

C'est un ouvrage hydraulique destiné à recevoir les eaux de ruissellement provenant de la voie et talus et les eaux de pluie.

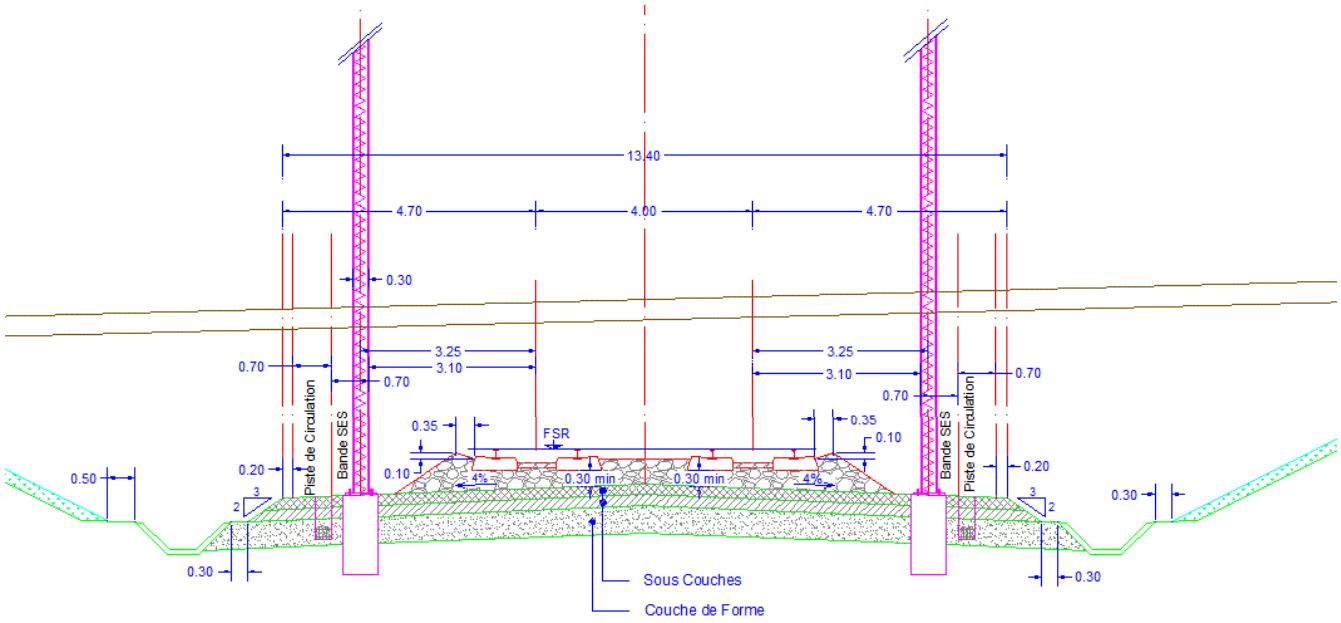


Figure I-35 : profil en travers types d'une voie double[4]

I.16 Terrassements :

L'infrastructure est la partie inférieure sur laquelle repose la voie, elle sert à répartir et à transmettre les charges induites par les trains au sol support. Dans ce chapitre, on va déterminer les différentes dispositions permettant de rendre les talus stables.

La performance d'une ligne dépend principalement de la qualité de sa fondation. Ce qui nécessite des aménagements spécifiques du terrain tels que déblais, remblais, talus conçus de manière adéquate pour répondre aux charges de trafic prévues et différents charges dynamique.

La succession des déblais et des remblais est caractérisée par des hauteurs pouvant être importantes (supérieure à 8m pour remblais ,12 m pour déblais) **[5]**.

I.16.1 Pente de talus

Les pentes de talus principalement utilisées selon référentiel technique de SNTF chapitre7.2.2 « ouvrages en terre », et exprimées en fraction base « H » sur hauteur « V », sont

- En déblai : 1/2, 2/3, 1/1, 3/2, 2/1, 2,5/1, 3/1
- En remblai : 3/2, 2/1.

Elles doivent être déterminées de façon à assurer la stabilité et la pérennité générale de l'ouvrage en fonction des caractéristiques géotechniques des terrains recoupés en déblais, ou

du sol support et des matériaux mis en œuvre pour les remblais ; de la hauteur de l'ouvrage et de la topographie de site et des risques naturelles.

Les talus peuvent être réalisés avec certains aménagements tels que risberme intermédiaire en déblai et banquette latérale en remblai ou des dispositifs de drainage pour satisfaire les conditions de stabilité **[5]**.

I.16.2 Déblai

La géométrie des talus en déblais choisie basée sur la géométrie de la plateforme ferroviaire, type de structure d'assise retenu et type de drainage. Tout en assurant la stabilité de l'ouvrage en respectant coefficient globale de sécurité F [8] :

- $F \geq 1.5$ pour la stabilité à long terme.
- $F \geq 1.3$ pour la stabilité à court terme.
- $F \geq 1$ pour la stabilité sous la sollicitation sismique.

Des dispositifs d'assainissements de drainage (fossé de crête, fossé en pied de talus et éventuellement des descentes d'eau) seront mis en œuvre pour capter et canaliser les eaux de ruissellement vers des exutoires appropriés, limitant ainsi le risque d'érosion des talus.

I.16.3 La sécurité dans les zones de déblais

La prévention des instabilités locales, qui est détectée pendant l'excavation des déblais, il convient de prévoir des mesures de stabilisation et de soutènement des talus, tels que le traitement avec des boulons d'ancrage, des grilles à mailles hexagonales, le gunitage…etc.

Comme critère général :

- Lorsque les déblais sont effectués dans des terrains rocheux, il peut être possible de disposer au pied des talus pour récupérer les possibles blocs qui pourraient se détacher.
- Pour la stabilisation des talus, il faudra disposer des fossés de crête de talus, ainsi que des tuyaux en descente en béton. De la même façon, la surface des talus sera traitée avec des plantations.
- Dans le cas où peuvent apparaitre des instabilités locales avec détachement des blocs, il est à envisager le rabotage localisé de blocs, la projection de béton, le boulonnage local, la disposition de grillage antichute...
- Il est recommandé de disposer des fossés revêtus dans les bermes pour contrôler l'eau

D'écoulement et éviter son infiltration dans les déblais **[5]**.

I.16.4 Vérification de la stabilité des talus en remblais :

Au-delà d'une certaine hauteur limite de remblai, il y'a risque de rupture, se présentant généralement sous forme de glissement de talus.

Les méthodes d'études de stabilité des pentes permettent de déterminer cette hauteur limite pour un coefficient de sécurité donné, connaissant :

- Les caractéristiques géométriques du remblai et des couches du sol de fondation.
- Les caractéristiques mécaniques du remblai et du sol de fondation.
- Le régime hydraulique (le plus souvent définition du niveau de la nappe).
- Les facteurs de sécurité globaux, à prendre en considération sont les suivants :

  - Fs ≥ 1,5 pour l'analyse en conditions statiques.

  - Fs ≥ 1,0 pour l'analyse en conditions sismiques**[5]**.

I.16.5 Réutilisation des matériaux de déblais (déblais mise en remblais)

En raison des coûts énormes des travaux de terrassements, les constructeurs essaient d'utiliser le maximum des sols extraits en remblais pour réduire les coûts de transport et d'achat des matériaux conformes à l'utilisation pour remblais. Les conditions de réutilisation des matériaux sont définies par le GTR **[5]**.

I.16.6 Remblai

Pour exécution des remblais il est toujours nécessaire de débarrasser le sol de tout ce qui pourrait nuire à la liaison du terrain en place avec les remblais tels que les racines, souche et débris de tout nature et la terre végétale sur une épaisseur suffisante.

La largeur de la partie supérieure du remblai (arase terrassements) est fonction :

- La géométrie de la plateforme ferroviaire.
- Type de structure d'assise retenu.

Pour la mise en place des remblais on remblaie d'abord les parties les plus basses ; on dispose les remblais par couches successives de 20cm d'épaisseur pour améliorer compactage et augmenter la cohésion des remblais**[5]**.

I.16.7. Structure des remblais :

La structure des remblais peut être composite (remblai avec noyau et enveloppe, remblai avec matériaux de zone inondable) :

I.12.6.1.Remblai en zone courante (non inondable) :

Dans la figure suivant se présente la structure de remblai en zone courante (non inondable), elle est constituée par un noyau et une enveloppe **[5]** :

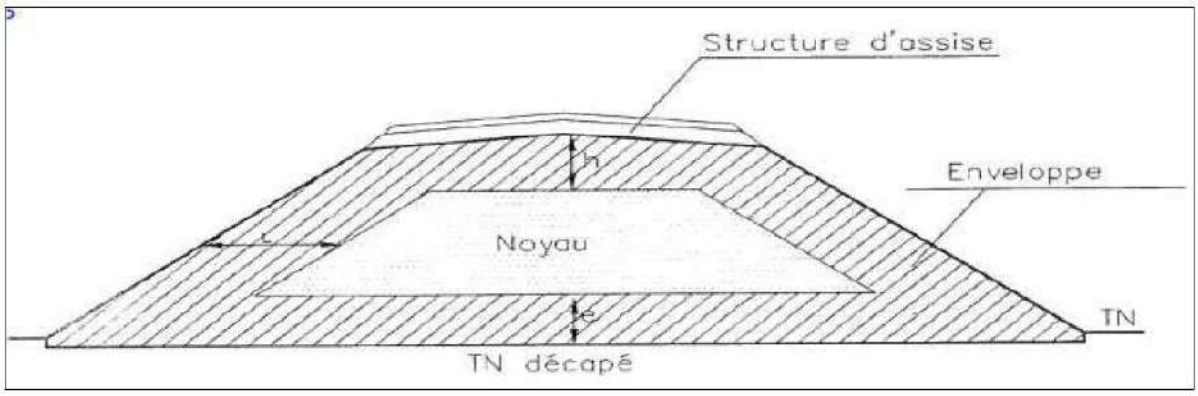


Figure I.36:Structure d'un remblai courant .[5]

Avec :

- ✓ e : épaisseur de l'enveloppe en base de remblai (1.00m minimum).
- ✓ l : largeur de l'enveloppe (3.00 m minimum).
- ✓ h : épaisseur de l'enveloppe au-dessus du noyau (1.00 m minimum).

I.16.7.2. Remblais en zone inondable :

Une partie du tracé est en risque d'inondations et de stagnation d'eau. L'observation sur terrain et l'analyse de la cartographie a permis la localisation d'une zone à risque d'inondation entre PK 41+090 et PK 42+640.

Les remblais en zones inondables doivent être dimensionnés selon la conception donnée dans le référentiel technique (voir Figure N° I.36) de manière à assurer leur stabilité et leur durabilité**[5]**.

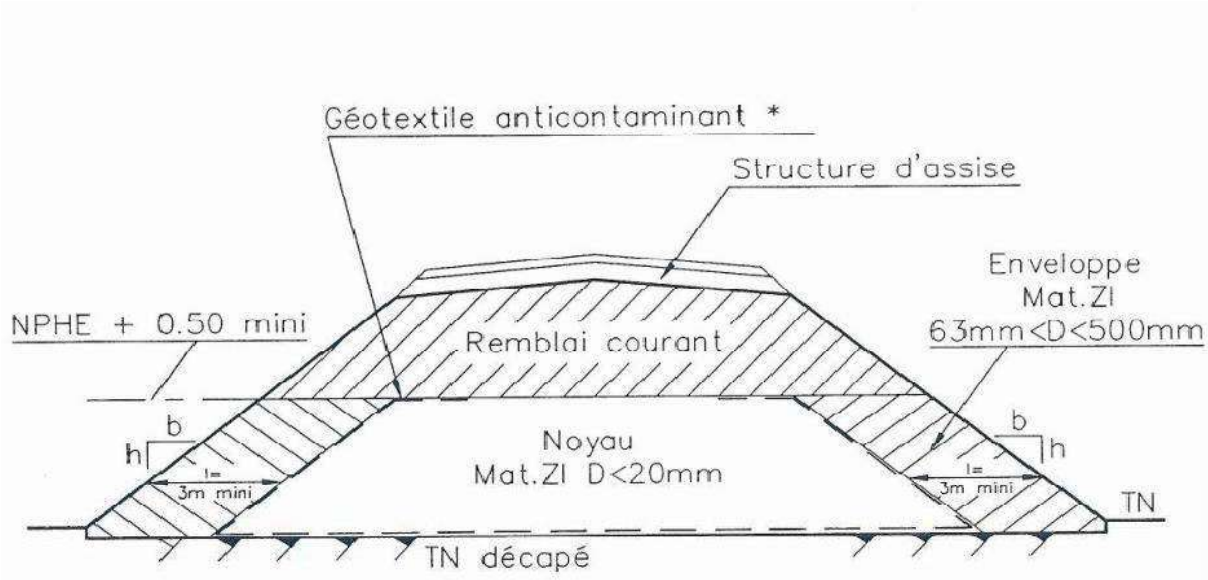


Figure I.37 : Structure d'un remblai en zone inondable.[5]

Selon les Spécifications Techniques ST 590 B (SNCF), les matériaux à utiliser pour la construction des parties des remblais susceptibles d'être immergées au niveau de zones inondables doivent être constitués de matériaux granulaires avec les caractéristiques suivantes :

- $63 \leq D < 500$ mm
- Tamisât à ($D \leq 200$ mm) : $85\% \leq$ % tamisat $\leq 99\%$.
- Passant à $80\mu m \leq 5\%$.
- $LA+MDE \leq 80$.

✓ Avec :

- D : Dimensions des granulats.
- LA : Los Angeles.
- MDE : Micro Deval d'Eau.

✓ Les bases de remblai devront être constituées de matériaux de ZI (Zone inondable) jusqu'à la cote NPHE+0,50m (NPHE Les niveaux des plus hautes eaux sont déterminés par l'étude hydraulique) **[5]**.

I.17 Etude d'impact sur l'environnement.

L'étude d'impact sur l'environnement est une étude d'évaluation des incidences directes ou indirectes d'un projet sur l'équilibre écologique, la qualité et le cadre de vie des populations vivant dans la zone d'implantation du projet et dans les zones adjacentes.
L'étude consiste à évaluer l'effet du projet de la réalisation de la ligne ferroviaire sur l'environnement en vue de prévoir les mesures nécessaires pour supprimer, diminuer ou compenser les impacts négatifs et améliorer les effets positifs du projet**[6]**.

I.17.1 Contexte juridique

Le projet est assujetti à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement en vertu des dispositions de la réglementation nationale en vigueur, notamment :

- **Loi 03-10** du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du
  développement durable.
- **Décret exécutif nº 06-198** du 4 Joumada El Oula 1427 correspondant au 31 Mai 2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection env.
- **Décret exécutif nº 07-144** du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.
- **Décret exécutif n° 07-145** du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et des notices d'impact sur l'environnement.
- **Loi n° 2002-02 du 22 Dhou El Kaada 1422** correspondant au 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral.
- **Décret exécutif n°09-88 du 21 Safar 1430** correspondant au 17 février 2009 relatif au classement des zones critiques du littoral**[2]**.

I.14 Conclusion :

La réalisation de la voie ferrée, qui est elle-même considérée comme une grande infrastructure contribuant au développement de notre économie.

Pour notre chapitre nous avons évoqué toutes les éléments constituants une voie ferrée, infrastructure, superstructure, signalisation et électrification, terrassement, environnement. Etc, aussi les caractéristiques géométriques de la ligne ferroviaire qui obéissent à des règles et des formules spécifiques en respectant les normes U.I.C, pour éviter les contraintes rencontrées sur le terrain et on a pris en considération, le confort, la sécurité des usagers ainsi bien que l'environnement.

Chapitre 02

Présentation de projet

II. Introduction

Dans le programme du développement des transports ferroviaires en Algérie, L'Agence Nationale d'Étude et de Suivi des Réalisations des Investissements Ferroviaires (ANESRIF) a adopté un programme de restructuration du réseau ferroviaire National par la modernisation des lignes existantes. Cette modernisation comprend l'augmentation des vitesses de circulation par la rectification du tracé des lignes, la remise en état des plateformes ferroviaire, l'électrification, le renouvellement de la voie et du ballast et la construction de nouvelles lignes moderne. Dans ce qui suit nous allons présenter notre projet.

II.1. Description globale du projet :

Le projet a pour objet l'élaboration de l'étude d'avant-projet détaillée (APD) pour la réalisation d'une nouvelle ligne mixte (voyageurs et marchandises) électrifiée à 220km/h entre Saida et El Bayadh, d'une longueur d'environ deux cent (200) km pour une vitesse d'exploitation à 220Km/h.

L'ensemble de ces raccordements doit permettre de réduire de façon substantielle les temps de parcours entre ces villes, ce qui aura des incidences positives sur l'économie locale, régionale et même nationale. La prévision du temps de parcours pour les trains de voyageurs et marchandise souhaités de ces raccordements Saida– EL Bayadh est :

- Voyageurs : 1 h 17.
- Marchandises : 2 h 27.

Le tracé de la nouvelle ligne Saida / El Bayadh sur une longueur d'environ 200.60 kilomètres, il suit une direction Sud-Ouest traversant deux wilayas entre Saida et El Bayadh.
La répartition du linéaire est comme suit :
Il débutera dans la wilaya de Saida précisément à la ville de Saida sur 62km (31%),138.6km (69%) dans la wilaya de El Bayadh.

Le tracé relie sept « 07 » agglomérations importantes sont :

- La ville de Saida.
- La ville de Ain El Hadjar (Saida).
- La ville de Sidi Ahmed (Saida).
- La ville de El Kheither (El Bayadh).
- La ville de Bougtob (El Bayadh).

- La ville de Kef El Ahmar (El Bayadh).
- La ville de El Bayadh.
- 6 gare de croissement.

Il contient 40 pont de franchissement (Passage Supérieur), 5 Ouvrage d'Art type caisson en béton armée (Passage inférieur), Trois Pont ferroviaire (Pont Chott chergui PK 92+800 L=2400m, pont au PK 135+975 L=1125m, Pont au PK 140+240 L=850m), Un Tunnel au PK 191+550 sur une longueur 3200m **[8]**.

II.2. Localisation du projet :

La nouvelle ligne ferroviaire est située à l'ouest de l'Algérie comme la montre dans l'annexe A1 Le PK 0+000 origine de la nouvelle ligne ferroviaire se trouve à la sortie de La ville de Saida, Elle traverse la wilaya de Saida par trois (3) communes, ensuite la wilaya de El Bayadh où se situe le tronçon le plus le long du projet, (4) communes sont traversées dans cette wilaya (voir Figure II-2) **[8]**.



Figure II.1 : Vue satellitaire du projet Saida-El Bayadh

Le tronçon concerné par notre étude est situé au sud de la ville de Saida, il débutera juste Avant la ville de Sidi Ahmed au PK 29+000 et s'étendra sur 26 km contenant une nouvelle gare de voyageurs à Sidi Ahmed et se terminera au PK 55+000 (Figure II.2) **[8]**.



Figure II.2 : Vue satellitaire du secteur de tracé concerné par l'étude

II.3. Présentation de la wilaya de Saida

La wilaya est située dans l'ouest algérien et elle s'étend sur une superficie de 6 613 km2. La wilaya de Saïda est délimitée depuis le découpage administratif de 1985, comme suit :

- Au nord par la wilaya de Mascara
- À l'ouest par la wilaya de Sidi-Bel Abbés
- Au sud par la wilaya d'El-Bayadh
- À l'est par la wilaya de Tiaret **[1]**.

II.3.1 Relief

Saïda se situe dans les derniers contreforts tabulaires du versant sud de l'Atlas tellien qui est formé par les monts de Tlemcen, de Daya et de Saïda et au seuil des hautes plaines steppiques et des hauts plateaux. Elle est située entre l'extrémité des monts de Daya au nord et la région des hauts plateaux au sud. Elle s'étend au pied de ces deux massifs de l'Atlas tellien que traves l'oued de Saïda. Située au fond d'une vallée a une altitude moyenne de 800m, Saïda est entourée par les monts de Daya a l'ouest (Sidi Ahmed Zeggaï) au sud par le montage de Sidi Abdelkader et les fameux tétons d'Aicha, à l'Est par les monts de Saïda avec entre autre le Djebel de Tiffrit qui culmine à 1200m. La vallée est couverte d'une vaste superficie forestière de 156 Ha soit 23.5% de la superficie globale de la wilaya **[8]**.



Figure II.3 : Le relief en allant de Saida vers EL Bayadh

II.3.2. Climat

Semi-aride, le climat de la région est sec et chaud en été et très froid en hiver. Il est rude et sec.

-Précipitation

Le module moyen annuel des précipitations au niveau de la station de Saida est estimé à 326.41 mm pour la période allant de 1970 à 2009 avec un maximum de 41.43 mm enregistré au mois de novembre et un minimum en mois de juillet estimé à 4.83 mm.

II.3.3 Contexte hydrologique générale :

L'étude hydrologique a pour but de déterminer les bassins versants traversé par le tracé, et définir les caractéristiques des crues des différentes périodes de retour. Elle permettre de prévoir les dimensions des différent dispositifs et ouvrages de drainage et d'évacuation des eaux pluvial le long du tracé de la ligne ferroviaire **[8]** .

Le tronçon étudié passe par le bassin versant de chott chergui numérote 08 selon la nomenclature de l'ANRH (Agence Nationale des ressources hydrologiques). Le bassin versant du chott Chergui fait partie des hautes plaines algériennes formées par une série de 15 sous bassins et caractérisées par un relief peu accusé. Sa superficie est de 36290 km2 et son périmètre est de 1111 km. .[8]

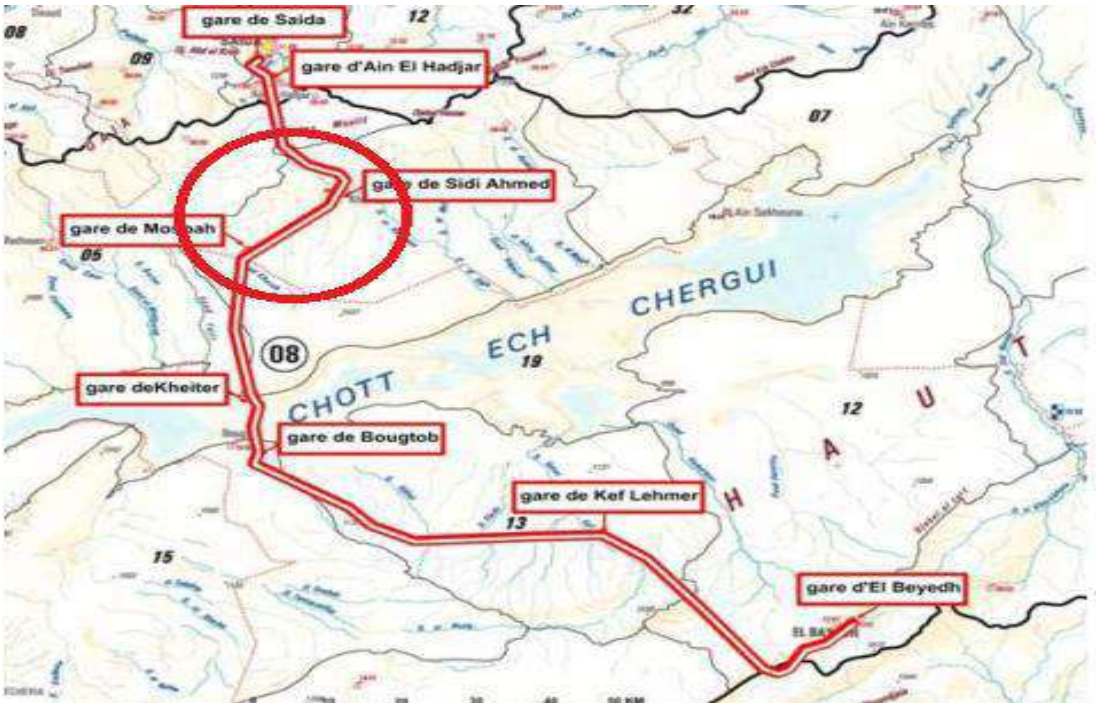


Figure II.4 : Situation du tronçon ferroviaire sur la carte des bassins versant de l'Algérie.[8]

II.3.1. Le climat

La région de Saïda, soumise à l'influence d'un climat de type méditerranéen, est caractérisée par le contraste entre une longue saison estivale, sèche et chaude et une saison hivernale pluvieuse et froide. Néanmoins les influences sahariennes sont prédominantes et déterminent un régime thermique qui traduit un climat semi-aride.

II.3.2. Pluviométrie

Pour déterminer les précipitations maximales journalière et annuel on a exploité les donnes pluviométriques de la station 080502 enregistré par l'ANRH sur un période de 47 ans

Tableau II.1 : Précipitations moyennes mensuelles et moyenne annuelle à la station De Saida, pour la période 1970-2009.

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	an
Saida	20,03	34,35	41,43	39,43	37,43	35,83	30,03	33.13	29,73	10,63	4,83	9,53	326,4

II.3.2.1. Pluies maximales annuelles

L'ajustement à une loi racine-normale des pluies annuelles de la région nous donne les pluies annuelles pour des fréquences allant de 0.9 à 0.99 qui correspondent aux périodes de retour de 10 à 100 ans.

Tableau II.2. Pluies maximales annuelles.[8]

Période de retour(ans)	10	20	50	100
U. Gauss	1,282	1,645	2,054	2,327
Pluie max annuelle	461	556	687	791

II.3.2.2. Précipitation journalière maximale

L'ajustement à la loi de Gumbel nous donne les pluies journalières maximales qui correspondent aux périodes de retour de 10 à 100 ans.

Tableau II.3. Pluies maximales journalière.[8]

Période de retour(ans)	10	20	50	100
U. Gumbel	2,3	3,0	3,9	4,6
Pluie max journalière	57.8	68.7	82.9	93.5

II.3.4. Caractéristiques physiques des bassins versants

La détermination des caractéristiques des bassins versant a pour but de calculer les débits des crues.

La détermination des caractéristiques des bassins versants se fait sur la carte d'état-major, et à l'aide du logiciel autocad.

Les paramètres déterminés pour chaque bassin sont :

- La Surface
- La Longueur Du Cours D'eau Principal.
- L'altitude Max
- L'altitude Min
- L'altitude Moyenne

- L'indice De Pente

II.4. Sismicité :

D'après le Règlement Parasismique Algérien « RPOA 99 / version 2003 », la wilaya de Saida appartient à une zone sismique « I ».

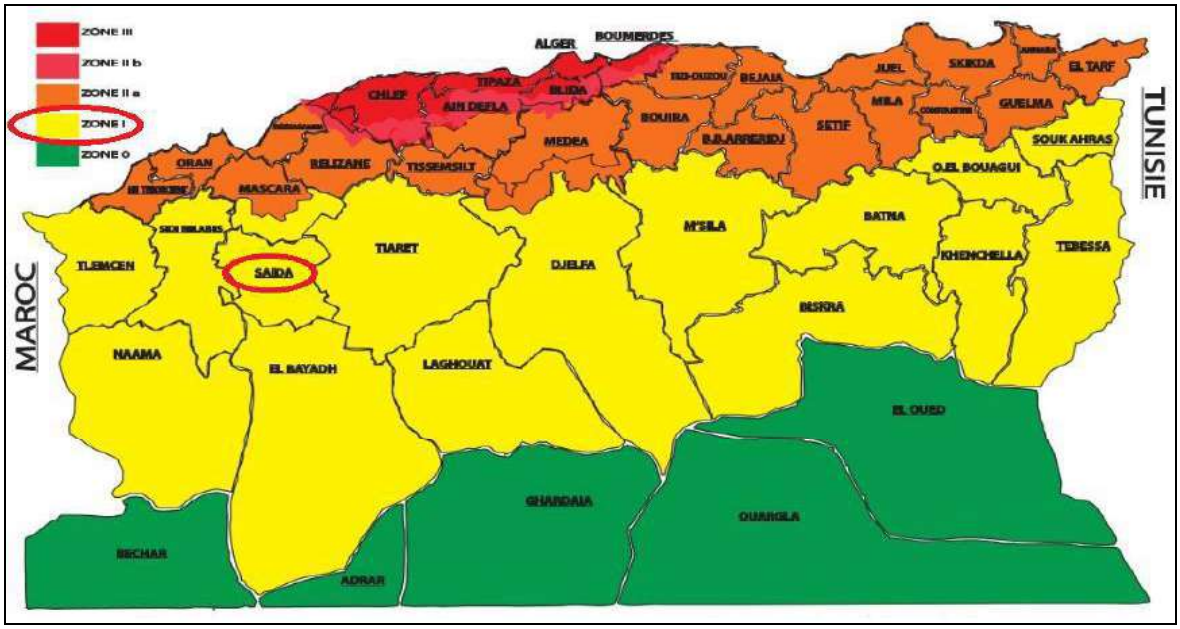


Figure II.5 : Carte de zonage sismique d'Algérie (RPOA 2008).

II.5. Eude géologique

II.5.1. Contexte géologique général de la région

La zone d'étude s'étale de la localité de Saida à El-Bayad, en passant par Bougtob sur un linéaire de 200km. Elle traverse la formation géologique :

L'Atlas tellien Plissé et l'atlas saharien, parcourt approximativement, du Nord au Sud, parcourt la zone de passage entre le tell et les hautes plaines, les Hautes plaines steppiques et les contreforts septentrionaux de l'Atlas Saharien **[8]**.

II.5.2. Contexte géologique de notre tronçon

Notre projet de la nouvelle ligne ferroviaire entre la wilaya de Saida et El Bayadh dont sa partie située entre PK 29+000 et PK 55+000 s'inscrit presqu'entièrement dans les hautes plaines.

On y trouve les formations du haut plateau qui se caractérisent par :

- Jurassique (Lias, Dogger, moyen)

- Quartenaire récent.
- Pliocène-Quaternaire Supérieur.
- Trais**[8]**.

1. Jurassique :

Lias : affleure sur la partie nord du horst avec un faciès carbonaté et un faciès marneux. Le premier faciès comporte des dolomies à passées de brèches sédimentaires, à ciment siliceux et des calcaires dolomitiques. Ces formations reposent en discordance sur celles au Trias ou directement sur celles du Primaire.

Le faciès marneux est caractéristique d'un milieu profond.

Dogger : essentiellement dolomitique et se subdivise en trois (03) niveaux : un Aalénien-Bajocien entièrement dolomitique, un Bajocien moyen à calcaire, dolomies et marnes, enfin le Bajocien- Bathonien composé essentiellement de calcaires et de marnes.

Jurassique supérieur : occupe la plus grande partie du territoire avec des formations argileuses terrigènes au callovo-Oxfordien, des formations terrigènescarbonatées de l'Oxfordien supérieur- Kimméridgien inferieur et enfin des formations franchement carbonatées du Kimméridgien- Portlandien**[8]**.

2. Trias :

Il est composé de trois (03) types de formations :

- Continentales reposant directement sur le primaire du Horst de Tifrit (conglomérats et grès rouges).
- Dépôt dans les zones de subsidence, constitués d'argiles bigarrées, violacées, gypseuses avec débris de roches anciennes et de basalte.

Enfin, les formations triasiques supérieures avec de haut en bas : des argiles intercalées par des dolomies, des calcaires et des brèches gypseuses, des roches effusives basiques, alternance de grès, gypses et calcaire**[8]**.

3. Pliocène-Quaternaire Supérieur :

Dépôts continentaux de conglomérats détritiques grossiers ferrugineux, parfois calcaires pélito-morphiques et tufs calcaires. La puissance ne dépasse pas 20 mètres.

4. Quaternaire récent :

Éluvions, diluions, sables et conglomérats visibles surtout le long des oueds. La puissance est de 10 mètres.

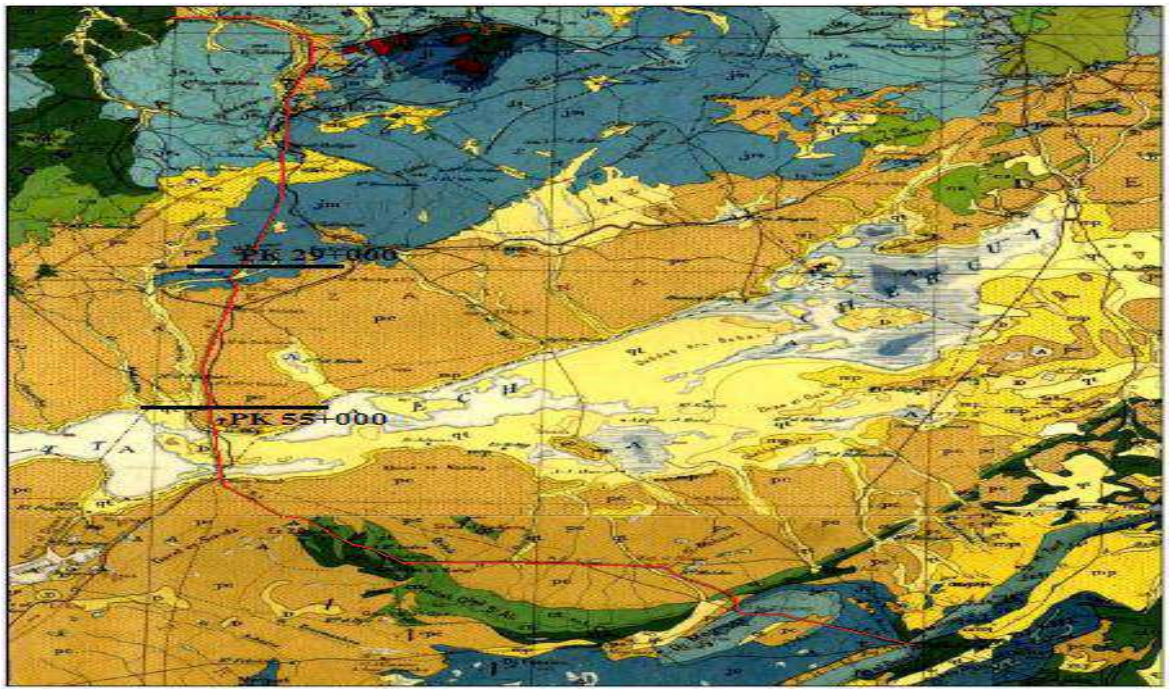


Figure II.6 : Situation de la zone d'étude sur l'extrait de la carte géologique au 1/500000 [8]

II.6. Caractéristiques de base du projet

Paramètres de tracé suivant les référentiels SNTF.

- Ligne à voie unique de 26 km.
- Ouvrages d'art prévus pour double voie.
- Ecartement standard (1435 mm en alignement).
- Entre axes : 4,20 m.
- Charge à l'essieu :

- Infrastructure : 25 T

- Ouvrage d'art : 25 T

- Gabarit d'obstacle : UIC (y compris caténaire en 25 kV).
- Voie équipée de rails UIC 60 posés sur traverses en béton armé (bi-bloc).
- Mode de traction : diesel / électrique.
- Vitesse de conception de la ligne :

- Voyageurs : 220 km/h,

- Marchandises : 100 km/h

- Signalisation de type ERTMS (European Rail Traffic Management System).

- Télétransmissions de type GSM-R (Global System for Mobile communication Railways) et fibre optique.
- Electrification en 25 kV/50Hz**[8]**.

II.7. Conclusion

Ce projet a pour un but de désenclavement et développement des régions du sud, de régler le problème de transport entre Saida et El Bayadh à la fois des personnes et de marchandise aussi de diminuer le temps du parcours pour permettre aux voyageurs de gagner du temps de déplacement tout en respectant toutes les normes, plus les exigences environnementales.

Chapitre 03

Etude géotechnique et dimensionnement de la structure d'assise

III. Introduction

L'étude géotechnique consiste à déterminer les caractéristiques physico-mécaniques du sol devant accueillir le projet étudié. Pour cela on fera une interprétation des résultats des campagnes de reconnaissance géotechnique, afin d'arriver à classer les sols rencontrés le long du tracé, classer la plate-forme pour le dimensionnement de la structure d'assise afin d'établir la procédure au mouvement des terres, il s'agit de déterminer les sols réutilisables au cours du projet et ceux qui sont à mettre en dépôt définitif et enfin les sols employés suivant certains conditions, en dehors des essais d'identification, on procède à des essais de compression simple, cisaillement, compression triaxiales, essais œdométriques,

III.1. Campagne de reconnaissance géotechnique

Cette campagne contient des essais d'identification classiques qui serviront à classer ou à identifier le sol. Ce classement servira à dimensionner la structure d'assise, ainsi que le calcul des tassements des terrains et les pentes à donner aux talus de déblais et de remblais.

Le programme de la campagne géotechnique établi dans cette étude, prévoit pour le tronçon objet d'investigation géotechnique la réalisation de :

Essai in situ	Nombre d'essai	Localisation	Objectifs d'essai
Sondages carottés	3	PK 29+866 PK 49+664 PK 52+360	Permettant de caractériser à la fois la nature et l'état des sols Et déterminer la description lithologique
Sondages pressiométriques	2	PK 49+664 PK 52+360	Effectuer les calculs de fondation
Essais au pénétromètre dynamique lourd	8	PK 029+600 PK 032+000 PK 034+580 2 en PK 037+440 2 en PK 041+120 PK 054+600	Estimer une caractéristique de portance la résistance des terrains traversés, et de prévoir la réaction du sol

Tableau III. 1. Programme de reconnaissance géotechnique (essai in situ)

Les puits de reconnaissance	10	PK 033+000 PK 034+580 PK 035+000 PK 037+440 PK 041+120 PK 043+950 PK 047+613 PK 053+ 000 PK 053+160 PK 054+600	Déterminer la portance du sol et caractériser les propriétés géotechniques des matériaux rencontrés

III.2. Essais au laboratoire :

Tableau III. 2 : programme de reconnaissance géotechnique (Essais au laboratoire).

Type d'essais	Norme
Détermination de la teneur en eau	NF P94-050
Limites d'Atterberg	NF P94-051
Densité apparente	NF EN1097-3
Analyse granulométrique	NF P94-056
Analyse sédimentométrique	NF P94-057
Valeur au bleu de méthylène	NF P94-068
Détermination de la teneur en carbonates	NF P94-048
Mesure de la teneur en matière organique	NF P94-055
Analyse chimique des sols : chlorure, sulfate et pH	NF P18-011, NF P18-660-1
Essai de cisaillement rectiligne à la boite	NF P94-071-1
Essai de compressibilité à l'oedomètre	NF P94-090-1
Essai CBR	NF P94-078
Essai Proctor	NF P94-093

III.2. Essais in situ

III.2.1.1. L'essai pénétromètre dynamique lourd (NF P 94-115)

L'essai consiste à enfoncer dans le sol, par battage de manière continue, un train de tige muni, en partie inférieure, d'une pointe débordante et à noter le nombre de coups nécessaires pour faire pénétrer dans le sol.

L'objet essentiel de ces essais au pénétromètre dynamique lourd effectués est de déterminer l'épaisseur de la couche de recouvrement et de déduire la résistance des différentes couches **[8]**.

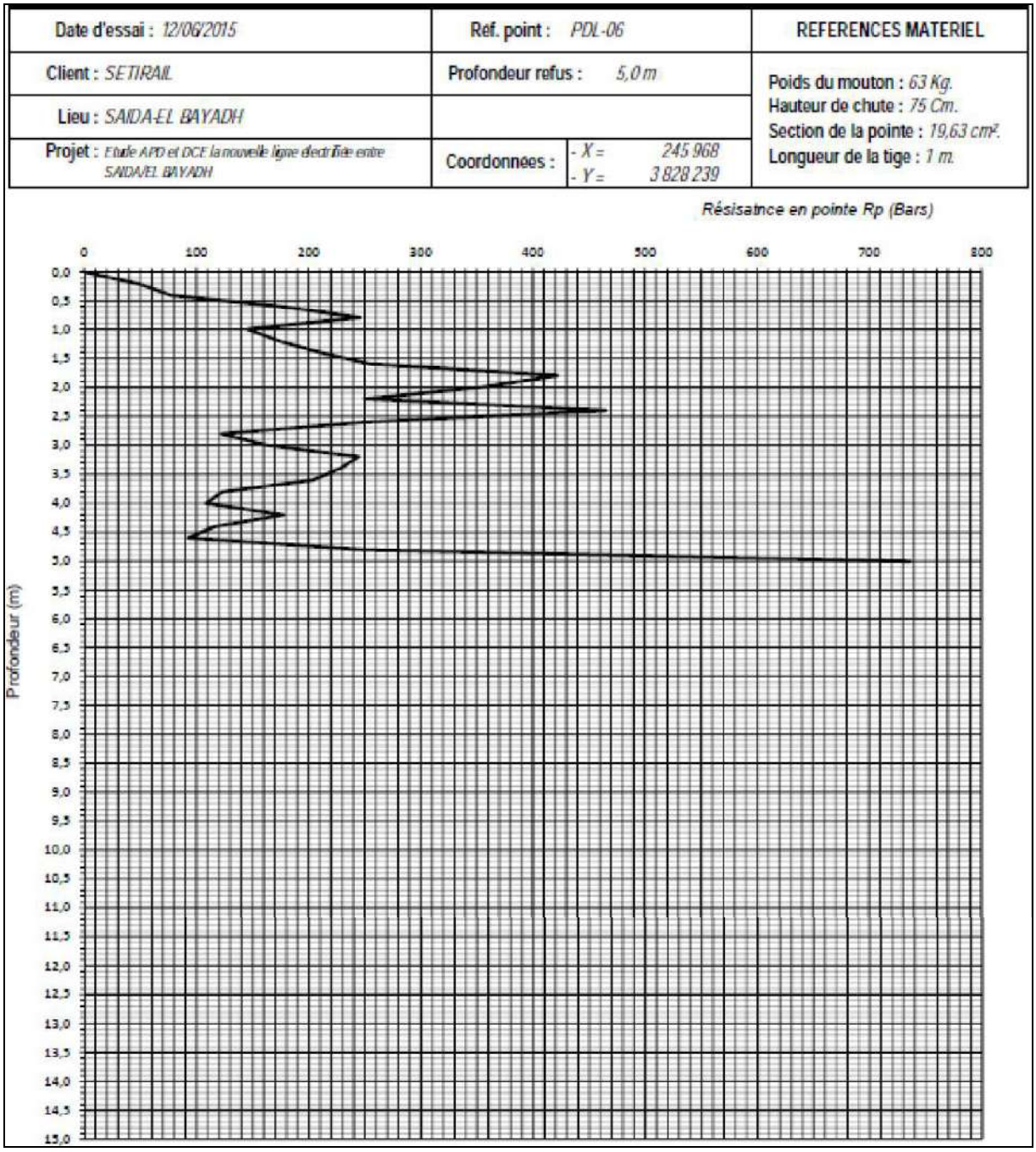


Figure III.1 : Profil d'essai au pénétromètre dynamique lourd (PK 32+000).[8]

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 3 : Récapitulation des résultats du PDL [8]

Référence d'essai	Localisation	Profondeur refus(m)	Résistance de point R_P (bar)	
			R_P MIN	R_P MAX
PDL-05-SB	PK 29+600	0.4	20	800
PDL-06-SB	PK 32+000	5.0	20	738
PDL-07-SB	PK 34+580	0.4	30	800
PDL-08-SB	PK 37+440	0.6	30	800
PDL-08-SB BIS	PK 37+440	0.4	80	800
PDL-09-SB	PK 41+120	0.6	50	800
PDL-09-SB BIS	PK 41+120	0.4	60	800
PDL-11-SB	PK 54+600	0.8	30	800

III.2.2. Essai préssiometrique Menard (NF P 94-110-1)

Le pressiomètre Louis Ménard est composé d'une sonde cylindrique gonflable tri-cellulaire dilatable radialement : appelée cellule de mesure à laquelle sont adjointes deux cellule de garde permettant de respecter ou mieux des conditions de déformation plane. La cellule de mesure est reliée par un système de tubulures à contrôleur pression volume CPV situé à la surface du terrain.

L'essai permis de calculer :

- La capacité portante des fondations superficielle et profondes.
- Le tassement des fondations superficielles.
- La stabilité de toutes les fondations.
- La déformation des pieux chargés latéralement et des palplanches.

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

Tableau V.4. Implantation et description des sondages pressiométrique. [8]

Localisation	Description	Profondeur (m)	E(bar)	PL(bar)	PF(bar)
PK 049+664	•0m-0.25m terre végétale. •0.25 m-1.7m Argile limoneuse beige à blanchâtre carbonatée, passage gréseux entre (1.1 et 1.7) m. •1.7m-15m Argile limoneuse marron à blanchâtre, compacte, passage grésifié entre (14.7 et 15) m.	2	1245.97	49.14	49.14
		4	1399.69	49.29	49.29
		6	1188.24	49.37	49.37
		8	1252.15	49.63	49.63
		10	1452.42	49.86	49.86
		12	1452.37	50.19	50.19
		14	1433.52	50.32	50.32
PK 052+360	•0m-0.25m terre végétale. •0.25m-3m Tuf beige à blanchâtre consolidé grésifié entre (0.7 et 1.2) m récupéré sous forme de fragments. •3m-15m Argile limoneuse brunâtre compacte, ferme vers la base, carbonatée, parfois cailloux consolidés.	2	328.88	22.15	14.12
		4	372.47	29.64	21.08
		6	1142.06	49.37	49.37
		8	1248.54	49.57	49.57
		10	1232.62	49.77	49.77
		12	1458.79	46.02	46.02
		14	1328.05	31.26	30.29

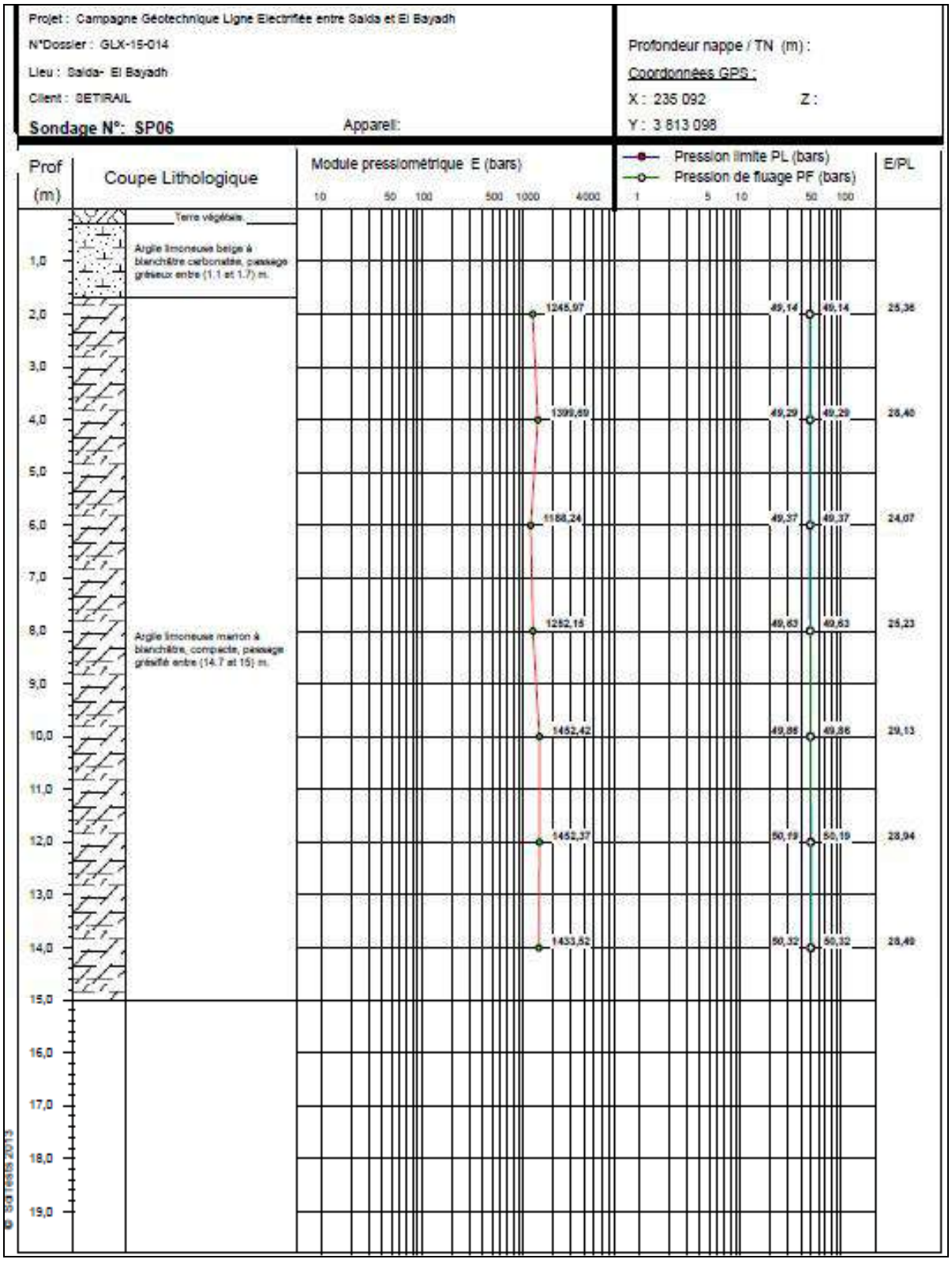


Figure III.2. Profil pressiométrique de l'essai SP06 PK 49+664. [8]

III.2.3. Les Sondages Carottés : Cet essai consiste à extraire des échantillons intacts pour observer la succession et la nature des couches du sol, et pour déterminer les caractéristiques physicomécaniques en laboratoire **[8]**

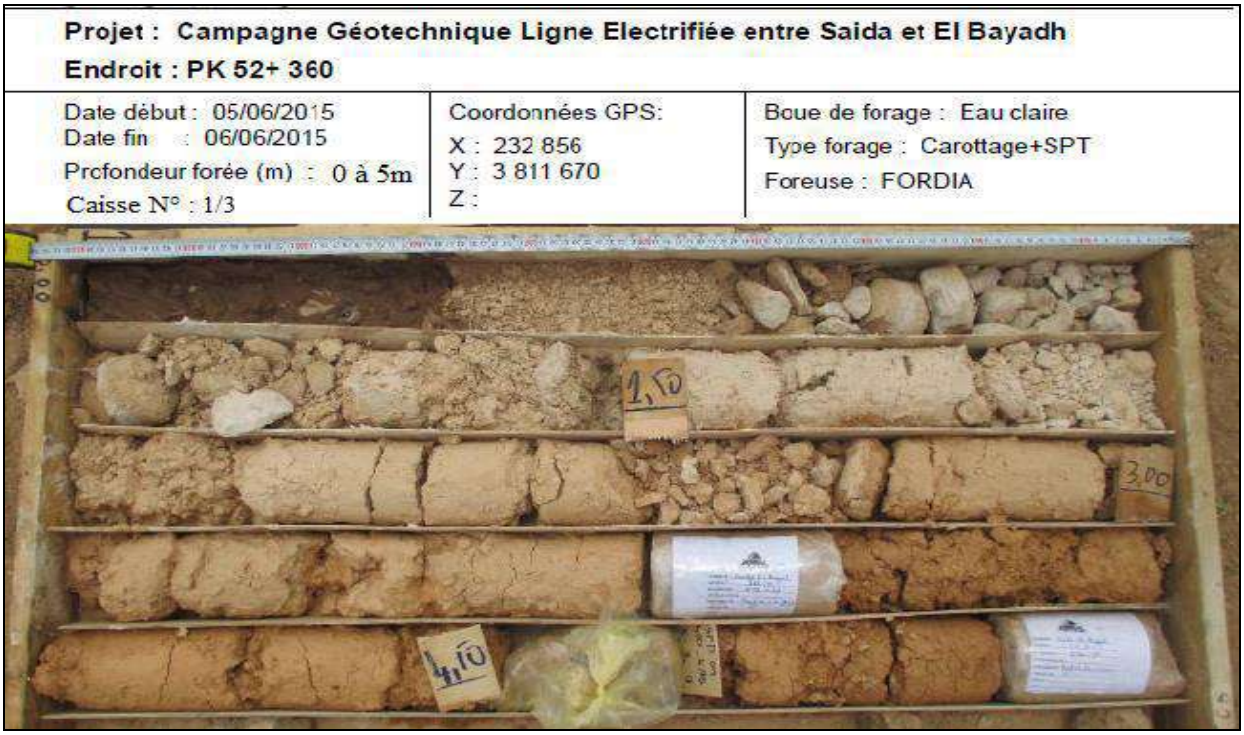


Figure III.3 : photos de sondage F-10-SB .[8]

Le tableau suivant présente les résultats des sondages réalisés sur le tronçon étudié :

Tableau III. 5: Implantation et description des sondages carottés. [8]

Localisation	Profondeur(m)	Description lithologique
PK 29+886	0.0 - 0.2	Terre végétale.
	0.2 – 2.7	Argile limoneuse beige à blanchâtre compacte à ferme, carbonaté, passage de calcaire entre(0.2 et0.3) m.
	2.7 – 12	Grés carbonaté gris à rougeâtre dure récupéré sous forme de fragments entre (3.2 et3.5) m (4 et 4.5) m, argile limono-sableuse très compacte à dure carbonaté marron à rougeâtre entre (6 et 7.5)m.
PK 49+664	0.0 – 0.3	Terre végétale.
	0.3 – 1.7	Argile limoneuse beige à blanchâtre carbonatée, passage gréseux entre (1.1 et 1.7) m.
	1.7 – 15	Argile limoneuse marron à blanchâtre, compacte, passage grésifié entre (14.7 et 15) m.
PK 52+360	0.0 – 0.3	Terre végétale.
	0.3 – 3.0	Tuf beige à blanchâtre consolidé grésifié entre (0.7 et1.2) m récupéré sous forme de fragments
	3.0 - 15	Argile limoneuse brunâtre compacte, ferme vers la base, carbonatée, parfois cailloux consolidés.

III.2.4. Les puits de reconnaissance :

Les puits de reconnaissance qui ont été réalisés sur le couloir à différentes profondeurs permettent de donner une description lithologique des terrains traversés et leurs épaisseurs, et une prise d'échantillons pour leurs analyses en laboratoire, ont été réalisés à l'aide d'une tractopelle tout au long du tracé (endroits accessibles) sur une profondeur refus entre 0.50 et 4.00 m.



Figure III. 4 : photos puit de reconnaissance PU-13[8].

Tableau III. 6: Implantation et description des puits de reconnaissances [8].

Référence d'essai	Localisation	Description lithologique	Type d'échantillon	Degré de cimentation	Résistance à l'excavation	Degré de stabilité des parois	Filtrations
PU-11-SB	**PK 33+000**	• **0.0 - 0.5m :** terre végétale.					
		• **0.5 - 2.5m :** Sable fin limono-argileux caillouteux (avec blocs), jaune à rougeâtre moyennement consolidé.	ER	M	HT	S	S
PU-12-SB	**PK 34+580**	• **0.0 - 0.3m :** terre végétale					
		• **0.3 - 0.5m :** dalle gréseuse carbonaté blanchâtre consolidé.		H	TH		S
PU-03-ZE	**PK 35+000**	• **0.0 – 2.9m :** Argile limoneuse marron à blanchâtre compacte à ferme, carbonaté marron vers la base.					
PU-13-SB	**PK 37+440**	• **0.0 - 0.5m :** terre végétale.					
		• **0.5m-1.5m :** Argile sablo-caillouteuse marron à rougeâtre, compacte avec concrétions carbonatés et blocs calcaire.	ER	M	TH	S	S
PU-14-SB	**PK 41+120**	• **0.0 - 0.5m :** terre végétale.					
		• **0.5m-3.1m :** Argile limono-caillouteuse beige à rougeâtre compacte à ferme vers la base avec précipitations carbonatés et blocs de calcaire	ER	B	HT	S	S
PU-15-SB	**PK 43+950**	• **0m-0.2m :** terre végétale.					
		• **0.2m-0.8m :** Dalle gréseuse beige à blanchâtre, carbonaté dure récupéré sous forme de fragments.		M	TH	S	S
		• **0.8m-1.4m :** Tuf beige consolidé avec cailloux calcareux.	ER	M	TH	S	S
PU-16-SB	**PK 47+613**	• **0m-0.2m :** terre végétale					
		• **0.2m-1.5m :** Tuf consolidé (grésifié) beige à blanchâtre avec blocs calcaire, récupéré sous forme de fragments.	ER	H	TH	S	S
PU-04-ZE	**PK 53+000**	• **0.0 – 0.2m :** Terre végétale.					

		• **0.2 – 0.7m :** dalle grésifié carbonaté beige à blanchâtre dure.		H	TH	S	S
PU-17-SB	**PK 53+160**	• **0.0 - 0.2m :** Terre végétale.					
		• **0.2 – 0.6m : Dalle gréseuse blanchâtre carbonaté dure, récupéré sous forme de fragments.**		H	TH	S	S
		• **0.6 - 1.3m :** Tuf beige à blanchâtre sur consolidé récupéré sous forme de fragments.	ER	M	TH	S	S
PU-18-SB	**PK 54+600**	• **0.0 – 3.9m : Argile sablo-limoneuse brunâtre, ferme avec concrétions carbonaté et** cailloux consolidés.	ER	M	M	S	S

Légende :

- Type d'échantillon recueilli : (EI = échantillon intact, ER = échantillon remanié).
- Degré de cimentation : N= Nul ; B= Bas ; M= Moyen ; H= Haut.
- Résistance à l'excavation : B= Basse ; M= Moyenne ; Ht= Haute ; TH= Très Haute.
- Degré de stabilité des parois : S= Stable ; CM= Chute de matériau ; CB= Chute de blocs
- D= déchaussement ; RC= Rupture circulaire ; E= Ecroulement.
- Filtrations : S=Sec ; LH=légèrement Humide ; H=humide ; G=Gouttant ; E= Ecoulement d'eau

III.3. Essai au laboratoire

Les échantillons issus des puits de reconnaissance et des sondages carottés soit des échantillons remaniés ou intacts ont été soumis à différente essais mécaniques et d'identification des propriétés physique et chimique ce qui concerne notre projet les essais qui ont été réalisés sont :

*Essai d'identification : .

- Les limites d'Atterberg.
- Essai Proctor.

*Essai Mécanique :

- Essai Oedomètrique .

- Essai de cisaillement rectiligne à la boite

*Essai physique :

- La teneur en eau.
- Analyse granulométrique.

*Essai chimique :

- Valeur au bleu de méthylène.

III.3.1. Essai d'identification

*Analyse granulométrique (NF P.94 - 056) / (NF P94-057) :

L'essai granulométrie s'applique à la description de sol en vue de sa classification, à la détermination des classes granulométriques et à la vérification de conditions granulométrique imposées. L'essai contribue à apprécier les qualités drainantes et la sensibilité à l'eau des matériaux ainsi que leur aptitude au compactage, Elle s'effectue au laboratoire par :

- Le tamisage : pour les particules à dimension supérieure à 80 μm.
- Analyse sédimentométrique : pour les particules a dimension inférieure 80 μm.

*Essai Proctor (NF P94-093) :

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

*Essai limite d'Atterberg (NF P94-051) :

Déterminer les teneurs en eau remarquables situées à la frontière entre ces différents états sont les :

- Limite de Liquidité : WL (frontière entre état plastique et liquide)
- Limite de Plasticité : WP (frontière entre état solide et plastique)

III.2.3.2 Essai mécanique

*Essai œdométrique :

Déterminer les caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permettent d'estimer le tassement d'un massif de sol

Tableau III. 7 : classification du sol en fonction de la compressibilité (XP P 94-090-1) [9]

C_c	Compressibilité
< 0.02	Incompressible
0.02 à 0.05	Très peu compressible
0.05 à 0.10	Peu compressible
0.10 à 0.20	Moyenne compressible
0.20 à 0.30	Assez fort compressible
0.30 à 0.40	Très compressible
> 0.4	Extrêmement compressible

*Essai cisaillement à la boite :

Le but de l'essai est d'obtenir les paramètres (Cu ;φ) [cohésion et angle de frottement] pour traiter les problèmes d'instabilités (rupture et glissement) due à la réalisation des remblais sur sols compressibles.

III.3.3 Essai physique

*Teneur en eau (NF P94-050) :

La procédure pratique de détermination de la teneur en eau d'un sol consiste à déterminer la masse d'eau existe dans le sol a l'état naturel.

III.3.4 Essai chimique 50

Essai bleu de méthylène (NF P94-068) :

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à absorber du bleu de méthylène. Cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments. (Le bleu de méthylène étant absorbé préférentiellement par les argiles, les matière organiques et hydroxydes de fer).

III.3.4. Résultat des essais au laboratoire

Les résultats des essais de laboratoire pour les échantillons prélevés des sondages carottés et des puits de reconnaissance (Analyse granulométrique, Essai Proctor modifié, Détermination de la teneur en eau, Limite d'Atterberg, Essais au bleu Méthylène).

Tableau III.8 : Résultats des essais au laboratoire.

Puits de Reconnaissance	Profondeur (m)	Teneur en eau	Limite d'Atterberg		Valeur au bleu	Analyse granulométrique			Essai Proctor	
		W(%)	W_L (%)	I_P (%)	VBS	D_{max} (mm)	< 2mm (%)	<80µm (%)	γd (t/m^3)	W_{OPM} (%)
PU-11-SB	0.50 - 2.50	7.15	-	-	0.14	50	44	23	1.87	11.8
PU-12-SB	0.30 – 0.60	Refus sur dalle gréseuse n'ayant pas permis le prélèvement d'échantillons en quantités suffisantes pour essais								
PU-13-SB	0.70 – 1.60	7	25	8	-	63	33	13	1.87	11.0
PU-14-SB	0.50 – 3.10	10	40	18	-	31.5	56	30	1.75	15.0
PU-15-SB	0.80 - 1.40	7	45	13	-	63	40	16	1.81	14.5
PU-16-SB	0.20 - 1.50	12	-	-	0.14	40	42	13	1.68	17.1
PU-17-SB	0.60 – 1.30	9	-	-	0.16	63	50	19	-	-
PU-18-SB	0.00 – 3.90	28	48	24	-	20	76	41	1.69	16.7
PU-ZE3-SB	0.00 - 2.90	28	-	-	0.24	14	93	82	1.50	21.2

Légende :

γd : Densité sèche (t/m3) ; WOPM: Teneur en eau optimale (%) ; VBS : valeur de bleu de00+ méthylène ; Dmax diamètre maximale (mm) ; < 2 mm (%) : Pourcentage des passants inférieure à 2 mm ; < 80µm (%) : Pourcentage des passants inférieurs à 80 µm.

*CBR Imbibé:

Les essais de portance CBR réalisés avec trois énergies de compactage (10c/c, 25c/c et 55c/c), ont donné bonne valeurs d'indices CBR à 95% de compacité, Un matériau dont I CBR ≤ 20 recommandé pour la couche de fondation les valeurs obtenus varient entre 09% et 60%avec une moyenne de 32%. Un matériau dont I CBR ≤ 20 recommandé pour la couche de fondation.

Tableau V.9 : Résultats des essais au laboratoire.

Sondage Carotté	Profondeur (m)	Cisaillement UU		Cisaillement CD		Essai Oedométrique		Compressibilité
		Cu (bar)	φ (degré)	Cu (bar)	φ (degré)	Cc (%)	Pc (bar)	
F-11-SB	4.00 - 4.20	0.17	29	-	-	30.9	6.38	Très compressible
	8.00 – 8.23	-	-	-	-	22.9	2.29	Assez fort compressible
	12.40-12.60	0.17	28	0.17	28	16.2	1.51	Moyenne compressible
F-12-SB	3.52 - 6.69	0.08	32	-	-	-	-	-
	9.55 – 9.71	0.21	22	-	-	81.4	4.52	Extrêmement compressible
	14.50-14.71	0.30	32	0.27	36	17.3	5.24	Moyenne compressible

Légende :

UU : Cisaillement direct non consolidé et non drainé.

CD : Cisaillement direct consolidé et drainé.

Cu: cohésion (état finale) ; φ : angle de frottement interne (état finale) ; CC : Indice de Compression ; pc : pression de consolidation

III. 3. 5 Classification des sols

III. 3. 5. 1 Application au projet

Tenant compte de l'essai in situ (PU-11-SB) PK 33+000 :

*Classifications selon GTR :

- Classe des sols :

Dmax = 50 mm ⇨ donc sol normal de classe de ce sol est A ou B ou D.

Le passant à 80µm est de 23 % ⇨ alors la sous classe de sol sera: B5 ou B6 . VBS = 0.14 < 0.2 ⇨ donc la sous classe sera B5.

- Classification selon l'état hydrique :

0.6 WOPN = 0.6 × 11.8 = 7.08 < WN = 7.15 < 0.9 WOPN = 0.9 × 11.8 =10.62

Donc selon classifications GTR le sol est de classe : B5s

*Classification selon UIC (719 R):

Le pourcentage des fines est égal à 23 % , Sol comportant de 15 à 40 % de fines Alors le sol est de classe QS1 (Sols médiocres)

Résultats de classification des sols représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.10 : Résultats de classification des sols.

Essai in situ	PK	Nature de sols	Classification de la Norme NF P 11 300	Classe de Qualité des sols
PU-11-SB	PK 33+000	Sable limoneuse	B_5s	Qs1
PU-13-SB	PK 37+440	Sable limoneuse graveleuse	$C1B_5s$	Qs2
PU-14-SB	PK 41+120	Argile limoneuse	B_6ts	Qs1
PU-15-SB	PK 43+950	Argile limoneuse graveleuse	$C1B_6ts$	Qs1
PU-16-SB	PK 47+613	Sable limoneuse	B_5s	Qs1
PU-17-SB	PK 53+160	Sable limoneuse	B_5	Qs1
PU-18-SB	PK 54+600	Sable argileux	A2th	Qs1
PU-ZE03-SB	PK 35+000	Limon argilo sableux	A1th	Qs1

III.4 Interprétation des résultats :

La réalisation des essais d'identifications et les essais mécaniques aux laboratoires sur plusieurs échantillons du sol prélevés de nombreuses profondeurs nous ont permis de faire deux classifications du sol :

*Selon la classification GTR :

En général le sol est Sable limoneuse (Sable limoneuse, Sable limoneuse graveleuse, Sable argileux)

*Selon la classification UIC719R :

Les classes des qualités des sols supports ce sont : du PK 29+000 au PK 37+000 QS1(Sol médiocre) et du PK 37+000 au PK 38+000 QS2(Sol moyenne) et du PK 38+000 au PK 55+000 QS1(Sol médiocre).

La classe de qualité du sol support le plus souvent rencontré le long du tracé est en majorité QS1 (Sols médiocres).

Ces sols peuvent, éventuellement, être transformés en sols de meilleure qualité par un traitement approprié, (traitement aux liants hydrauliques)**.**

Réutilisation des matériaux de déblais (déblais mise en remblais)

En raison des coûts énormes des travaux de terrassements, les constructeurs essaient d'utiliser le maximum des sols extraits en remblais pour réduire les coûts de transport et d'achat des matériaux conformes à l'utilisation pour remblais. Les conditions de réutilisation des matériaux sont définies par le GTR.

Dans les zones déblais on a un sol classifié par GTR (B5s) au Pk 47+613. D'après le GTR, ces sols sont très difficiles à compacter du fait de leur faible teneur en eau.

Tableau III.11. Utilisation de matériau en remblai.

Pk	Classe GTR	Utilisation de matériau en remblai
47+613	B_5S	- Soit de compacter intensément avec un arrosage superficiel. - Soit d'humidifier le matériau dans sa masse pour le remanier en B_5m.

III.5. Dimensionnement de la structure d'assise.

Pour les infrastructures linéaires de transport de type ferroviaire, la structure supportant la voie ferrée est un des éléments les plus importants pour assurer la stabilité géométrique, le drainage des eaux, et le bon fonctionnement à long terme de la voie. Elle est constituée généralement de plusieurs couches de matériaux superposées : le ballast, la sous-couche, couche de fondation, éventuellement une couche de forme et le sol support **[4]**.

III.5.1. Couche d'assise ferroviaire

La couche d'assise est composée de plusieurs couches chacune son rôle et son dimensionnement (la couche de ballast, la sous-couche et la plateforme) ; elle a pour but d'assurer le bon comportement de la voie ferrée du point de vue rigidité, tenue et drainage.
L'épaisseur minimale de la couche d'assise dépend des paramètres suivants :

- La classe de portance de la plateforme.
- L'armement de la voie (nature des traverses, profil des rails...).
- Les caractéristiques du trafic (tonnage, vitesses, charges) **[4].**

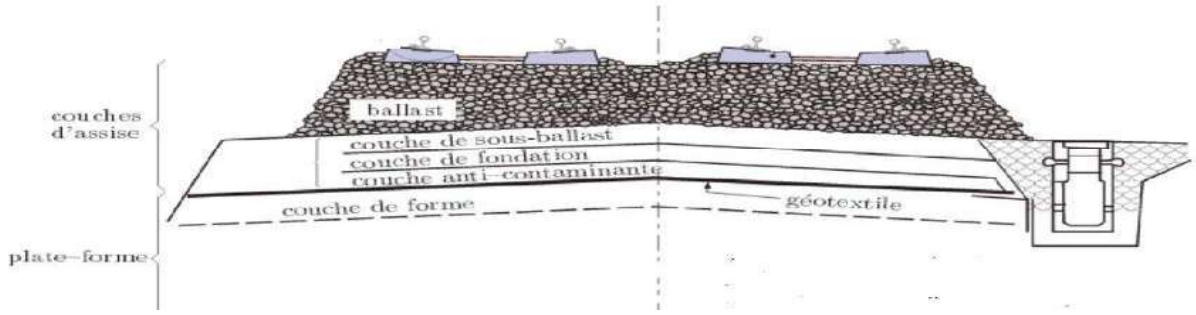


Figure III.5. Structure d'assise ferroviaire [4]

III.5.2. La plate-forme

Partie supérieure de l'ouvrage en terre supportant la sous-couche, elle est constituée de sol reporté dans le cas d'un remblai et du sol support dans le cas d'un déblai. La partie supérieure de la plate-forme est aménagée en couche de forme, avec une pente transversale de 4% **[4]**.

III.5.2.1. Classification de sol pour plate-forme :

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

- La nature géotechnique du sol.
- Les conditions hydrogéologiques et hydrologiques locales ; ces conditions, pour ce qui concerne l'influence sur la portance des sols **[4]**.

Classification des sols (Identification géotechnique)	Classe de qualité des sols
0.1 Sols organiques 0.2 Sols fins (comportant plus de 15 % de fines (1)) foisonnés, humides et donc non compactables 0.3 Sols thixotropes (2) (quick-clay par exemple) 0.4 Sols comportant des matériaux solubles (sel gemme ou gypse) 0.5 Sols comportant des matériaux polluants (déchets industriels, par exemple) 0.6 Sols mixtes "minéraux organiques" (2).	QS0
1.1 Sols comportant plus de 40 % de fines (1) (sauf sols 0.2) 1.2 Roches très évolutives Par exemple : - Craies de $\rho_d < 1,7$ t/m^3 et de friabilité forte - Marnes - Schistes altérés	QS1
1.3 Sols comportant de 15 à 40 % de fines (1) (sauf sols 0.2) 1.4 Roches évolutives Par exemple : - Craies de $\rho_d < 1,7$ t/m^3 et de friabilité faible - Schistes non altérés 1.5 Roches tendres Par exemple : Si microdeval en présence d'eau (MDE) > 40 et Los Angeles (LA) > 40	QS1 (3)
2.1 Sols comportant de 5 à 15 % de fines (1) 2.2 Sols comportant moins de 5 % de fines (1) mais uniformes ($C_U \leq 6$) 2.3 Roches moyennement dures Par exemple : Si 25 < MDE ≤ 40 et 30 < LA ≤ 40	QS2 (2)
3.1 Sols comportant moins de 5 % de fines (1) 3.2 Roches dures Par exemple : Si MDE ≤ 25 et LA ≤ 30	QS3

Figure III.6. Classe de la qualité du sol suivant la norme UIC-719R.P34

On distingue les quatre classes de qualité QSi de sols :

-QS0 : Sols "impropres" à la réalisation d'une plateforme correcte et nécessitante certaines mesures confortatives, (remplacement du matériau sur une certaine épaisseur, traitement aux liants, utilisation de géotextiles, renforcement par pieux, etc.)

-QS1 : Sols médiocres acceptables tels quels, dont on doit toujours se préoccuper du bon Drainage. Ces sols peuvent, éventuellement, être transformés en sols de meilleure qualité par un traitement approprié, (traitement aux liants hydrauliques).

-QS2 : Sols moyens.

-QS3 : Bons sols.

III.5.2.2. Classe de portance de la plate-forme

La portance d'une plateforme dépend :

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

On peut distinguer, en fonction des paramétrés ci-dessus les trois classes de portance de plateforme suivantes :

- P1 : plate –forme mauvaise.
- P2 : plate-forme moyenne.
- P3 : bonne plate – forme.

Le tableau suivant permet de déterminer la classe de portance de la plate-forme **[9]**:

Tableau III.12. La classe de portance de la plateforme [9]

Classe de qualité du sol	Classe de portance envisagée pour la plate-forme	Couche de forme mise en œuvre	
		Qualité	Epaisseur minimal en m
QS1	P1	QS1	-
	P2	QS2	0.5
	P2	QS3	0.35
	P3	QS3	0.5
QS2	P2	QS2	-
	P3	QS3	0.35
QS3	P3	QS3	-

III.5.2.3. Sensibilité au gel des sols :

On peut diviser les sols en trois classes, selon leur degré de sensibilité au gel :

- Sol insensibles au gel ;
- Sol sensibles au gel ;
- Sols très sensibles au gel.

Pour ce qui concerne les classes granulaires élémentaires la sensibilité au gel s'évolue sans difficulté au moyen du barème ci- après :

- Insensible au gel……..Gravier et sable.
- Sensible au gel…….Argile.
- Très sensible au gel…….Limon.

-Un sol insensible au gel est un sol pour lequel le gel et le dégel n'occasionnent pas de déformations inacceptables pour ce qui concerne le nivellement de la voie.

-Un sol sensible ou très sensible au gel est un sol pour lequel la formation de lentilles de glace observée sous certaines conditions de teneur en eau et de température est la cause de désordres inacceptables pour ce qui concerne les nivellements longitudinaux et transversaux de la voie.

Par conséquent Le dimensionnement des couches d'assise doit prendre en compte a la fois :

- Les problèmes de portance
- Les problèmes du gel **[9].**

III.5.3. Epaisseur des couches d'assise.

L'épaisseur de la couche d'assise (e=épaisseur de ballast + épaisseur de la sous-couche) est donnée, selon la norme UIC 719R, par la formule suivante : e(m)=a+b+c+d+e+f+g.

Valeurs de E selon UIC 719R P57 :

- E = 0.70 m pour une plateforme de classe de portance P1.
- E = 0.55 m pour une plateforme de classe de portance P2.
- E = 0.45 m pour une plateforme de classe de portance P3.

Valeurs de « a » selon UIC 719R :

- a = 0 m : lignes de groupe UIC 1 et 2, V> 160 km/h.
- a = -0,05 m : lignes de groupe UIC 3.
- a = -0,1 m : lignes de groupe UIC 4, 5,6 et 7, 8,9 avec voyageurs.
- a = -0,15 m : lignes de groupe UIC 7, 8,9 sans voyageurs.

Valeurs de « b » selon UIC 719R :

- b = 0 m : traverses bois de longueur L=2.60 m.
- b= (2.5–L)/2 : traverses en béton de longueur L (b et L en (m), b< 0 si L> 2.5m).

Valeurs de « c » selon UIC 719R :

- c = 0 m: dimensionnement normal.
- c = -0.1 m: lignes de groupe UIC 7, 8,9 sans voyageurs, et pour les voies de service de

catégorie B, C.

- -0.05 à titre exceptionnel pour des opérations difficiles sur lignes existants de groupe UIC

7 ,8,9 sans voyageur.

Valeurs de « d » selon UIC 719R :

- d = 0 m : si la charge nominale maximale d'essieu ≤ 200 KN.
- d = 0,05 m : si la charge nominale maximale d'essieu = 225 KN.
- d = 0,12 m : si la charge nominale maximale d'essieu = 250 KN.

Valeurs de « c » selon UIC 719R

- f = 0 m : pour toutes les lignes parcourues à une vitesse≤ 160km/h et pour la plateforme

de classe de portance P3 des lignes quelles que soit la vitesse.

- f = 0,05 : pour toutes les plates-formes de classe de portance P2 ou bien des lignes parcourues à grande vitesse V>160km/h.
- f =0,10 m : pour toutes les plates-formes de classe de portance P1.

Valeurs de « g » selon UIC 719R :

- g =+ 0.01 présence de géotextiles lorsque la couche de forme est en sol QS1 ou QS2.
- g =0 pas de géotextile lorsque la couche de forme est en sol QS3.

- Géotextile :

+ Géotextile lorsque la couche de forme est en sol QS1 et QS2.

0 géotextile lorsque la couche de forme est en sol QS3 [9] .

III.6. Application au projet

III.6.1. Classification du sol de la plate-forme

D'après les résultats de l'étude géotechnique on constate que le sol est de classe QS1 (sol médiocre). La classe de portance envisagée pour le projet et la classe P2, donc il est nécessaire de réaliser une couche de forme pour augmenter la portance.

III.6.2. Détermination de l'épaisseur de la couche d'assise

D'après la fiche UIC 719 on détermine les paramètres relatifs à notre projet et qui permettent de déterminer l'épaisseur de la couche d'assise (ballast + couche de forme). Le tableau suivant résume les valeurs des différents paramètres :

Tableau III.13. Paramètre de dimensionnement de la sous-couche

Paramètre	Valeur (m)	Description
E	0.55	Plate-forme de classe de portance P2
a	0	Vitesse supérieure à 160 km/h
b	0.13	Traverse bibloc en béton L=2.24
c	0	Dimensionnement normal
d	0.05	Charge maximale d'essieu des véhicules remorqués et de 225 KN
f	0.05	Plate-forme de classe de portance P2
g	0	(Sans géotextile) couche de forme en sol QS3.

L'épaisseur totale de la couche d'assise (ballast et sous couche) est :

e = a+ b+ c + d + e + f + g =0.55+0+0.13+0+0.05+0.05+0=0.78 m.

En prend e=0.80 m.

- L'épaisseur de la couche de ballast est de 30 cm.
- La couche de forme de classe de portance P2 réalisé sur un sol de classe QS1 nécessite une épaisseur de 35cm pour une qualité QS3 de couche de forme. Alors la structure de la voie est comme suit :

Tableau III.14. Épaisseurs des couches.

Couche	Epaisseur (m)	Matériaux
Ballast	0.30	Ballast 25/50 mm
Sous-ballast	0.20	Grave bien gradué 0/31.5 mm
Couche de fondation	0.30	GC (grave concassée) 0/50 mm
Couche de forme	0.35	GNT

III.6.2. Synthèse

Le dimensionnement nous a permis de mettre en évidence les épaisseurs et la structure des différentes couches devant être présentes pour supporter et diffuser la charge transmise par le matériel roulant, assurer le drainage des eaux, et protéger le sol support.

III.7. Profil en travers

Le profil en travers d'une voie ferrée est la coupe transversale de cette dernière suivant un plan vertical perpendiculaire à l'axe de cette voie.
L'échelle la plus fréquemment utilisée est celle de 1/100.

III.7.1. Les déférents types de profil en travers

Il existe deux types de profil en travers qui sont :

III.7.1.1. Profil en travers type

Contenant toutes les dimensions et tous les détails constructifs (largeurs de voie, pentes des surfaces et talus, dimensions de l'infrastructure et de la superstructure, système d'évacuation des eaux etc.…).

III.7.1.2. Profil en travers courant

S'applique au PK indiqué, prend et mentionne toutes les données caractérisant la section transversale de la voie au PK considéré, notamment la cote du terrain naturel, la cote de projet et le dévers de la plateforme.

III.7.2. Les éléments du profil en travers

III.7.2.1. La plateforme

Il est conseillé de réaliser une plateforme à partir d'une succession des couches des matériaux parfaitement compactés, sur laquelle reposera la voie, à savoir : les rails, les traverses le ballast ainsi que le train lui-même.

La plate-forme reçoit les charges transmises par l'intermédiaire du ballast, elle joue un rôle primordial dans la tenue de la voie. En outre, elle draine les eaux de surface pour les écouler à l'extérieur.

III.7.2.2. L'Emprise

C'est la surface du terrain naturel affecté à la voie ; limitée par le domaine public.

III.7.2.3. Assiette

C'est la surface de la voie délimitée par les terrassements.

III.7.2.4. La voie

C'est la partie de la voie ferrée affectée à la circulation des trains.

III.7.2.5. 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.

III.7.2.6. Le fossé

C'est un ouvrage hydraulique destiné à recevoir les eaux de ruissellement provenant de la voie et talus et les eaux de pluie.

III.7.3. Les profils en travers affectés au projet

Pour notre projet on caractérise nos profiles en travers comme 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%.
- Largeurs de la berme : 0.30 m.
- Pente latérale de la berme : 4%.
- Entraxe : 4.2m.
- Pente latérale de la couche de ballast : 3/2, (3H et 2V).
- Epaisseur du ballast : 30 cm.
- Epaisseur du sous-ballast : 30cm.
- Epaisseur Couche de fondation : 20 cm.
- Epaisseur de la couche de forme : 35 cm.
- Pente (déblai : 3H /2V et remblai : 3H / 2V).
- Fossé trapézoïdale (b= 0.5 m ; h= 0.5 m).

Remarque :

On utilise en général une pente de 3H/2V en déblai et en remblai à cause d'il n'y a pas des hauteurs importantes.

En cas de raccordement (en pleine courbe), les épaisseurs de toutes les couches sauf le ballast seront fixes, c'est l'épaisseur de ballast qui va être augmenté pour créer le dévers exigé.

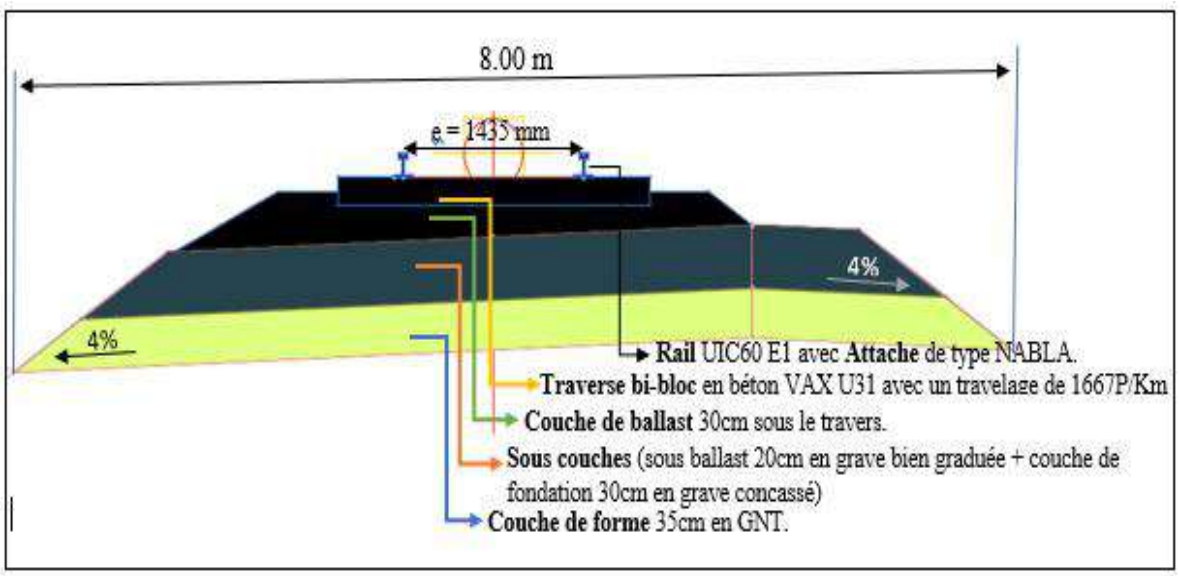


Figure III.13. Structure du profil en travers du projet

III.8. Recommandations pour les différentes couches de la voie ferrée.

III.8.1 Le ballast :

On appelle ballast le lit de pierres ou de graviers sur lequel repose une voie de chemin de fer.

La couche de ballast proprement dit composé de pierre de granulométrie 25/50. De type plutonique : granite, diorite…etc. On utilise du gravillon fin (10 mm à 35 mm) pour le nivellement. Les carrières où l'on extrait et transforme ces matériaux sont appelées ballastières. Il est aussi possible d'utiliser le laitier (produit par les hauts fourneaux).

Son rôle est de transmettre les efforts engendrés par le passage des trains au sol, sans que celui-ci ne se déforme par tassement. Le rôle du ballast est aussi d'enchâsser les traverses afin d'assurer une résistance aux déformations longitudinales (particulièrement important pour la technique des longs rails soudés) **[9]**.

Les éléments du ballast doivent s'imbriquer, de façon à former une masse compacte, mais perméable. Les traverses sont enchâssées dans le ballast, ce qui assure la fixité de la voie. Le ballast subit deux types d'usure :

- contamination par des matériaux parasites, par exemple de la terre. On procède à des désherbages, mais il est nécessaire de remplacer le ballast régulièrement.

- tassement du ballast sous les traverses, ce qui provoque une déformation verticale de la voie. Il est alors nécessaire de réinjecter du ballast de faible granulométrie Sous les traverses ; ou bien de réaliser une opération d'entretien à l'aide d'une bourreuse.

Les épaisseurs de ballast sont indiquées ci-dessous :

Epaisseur normale qui est de 0.30 m.

Epaisseur cas des viaducs et des tunnels qui est de 0.35 m **[9]** .

III.8.1.1Rôle et constitution du ballast :

Il est constitué de matériaux de carrière résistants durs, non gélifs (gneiss, porphyres, basaltes, etc.) anguleux et ayant une très forte résistance à l'abrasion.

Ce n'est pas un simple caillou mais un granulat produit à l'issue d'un processus industriel de fabrication et répondant à des caractéristiques précises et rigoureuses (formes, dureté, propreté...etc.)

Le ballast utilisé a des rôles multiples :

- Il assure, en raison de sa granulométrie particulière le drainage et l'évacuation rapides des eaux zénithales, ancrer les traverses.
- Il constitue un amortisseur de vibrations très efficace grâce à ses propriétés théologiques.
- Il permet, au moyen du bourrage- dressage mécanise la rectification très rapide du nivellement et du tracé.

La valeur de sa dureté globale DRG doit être égale ou supérieur à 17. La mise en place du ballast sera réalisée en deux couches :

La première couche d'épaisseur 15cm sera posé en premier lieu à l'aide de camions a benne, ou par train sur la voie qui n'à pas encore été renouvelé $V1$existante ce n'est qu'après la pose des rails qu'on complétera le ballast en accord avec le nivellement exigé par le profil en travers type **[9]** .

III.8.1.2. Caractéristiques physico-mécanique du ballast :

A. Caractéristiques physiques :

*Granulométrie : on utilise actuellement en Algérie la 25/50 mm, (documents SNTF).

*Forme des granulats : elle doit être poly hydrique avec des éléments d'arêtes vives, les granulats ne doivent être ni trop longs ni trop plats.

*Homogénéité des granulats : un ballast hétérogène (âge et dureté différents) s'altère très rapidement.

*Propreté des granulats : le ballast doit être exempte des éléments fins et débris.

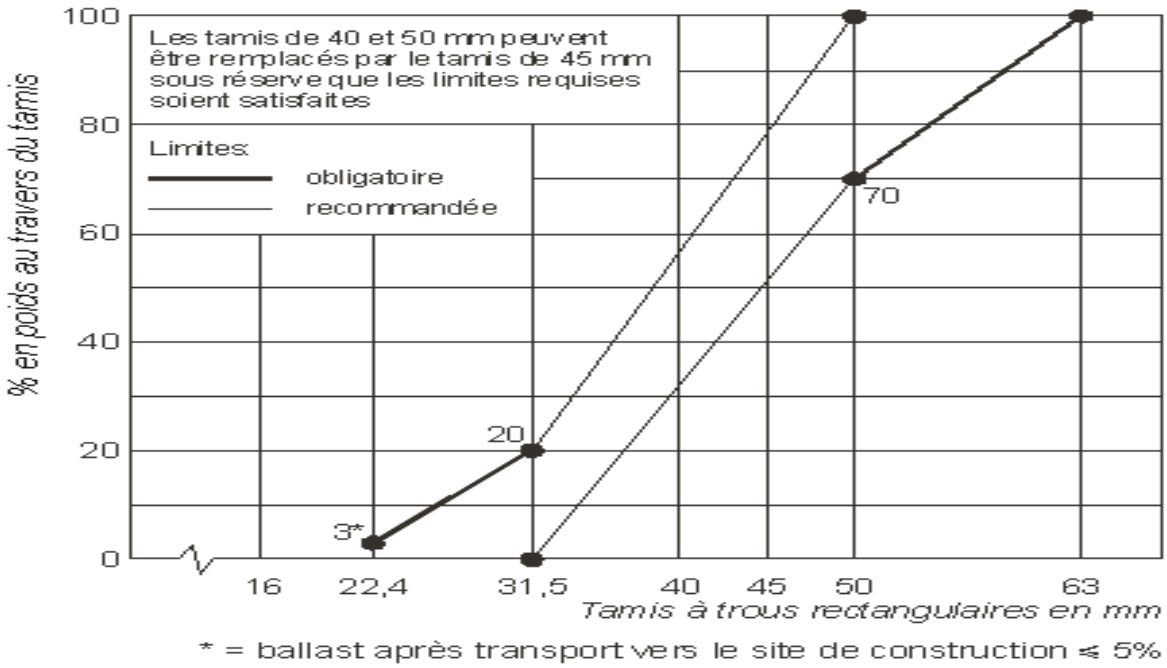


Figure III.14. Courbe granulométrique prescrite pour un ballast de voie principale. [9]

B. Caractéristiques mécaniques :

*Résistance à l'attrition :

Les matériaux de la couche de ballast, sous l'effet des charges concentrées et des vibrations, subissent des déplacements relatifs provoquant un frottement aux Points de contact les granulats.

Ce phénomène a été reproduit en laboratoire sous le nom d'essai « DEVAL » :

- Deval à sec DS,
- en présence d'eau Deval humide DH.

Essais Deval : le coefficient Deval (D) doit être supérieur à :

- DS> 14 pour les pierres dures (ballast)
- DH> 12 pour les calcaires (pierres carbonatées) (documents SNTF)

*Résistance aux chocs :

sous l'effet des contraintes transmises au ballast, il se produit un frottement des granulats entre eux, et des chocs engendrés par les traverses et les bourroirs,donc pour mesurer la résistance combinée a la fragmentation par chocs et l'usure par frottement

réciproque des granulats ,on réalise l'essai LOS ANGELES .Pour un ballast acceptable le coefficient LA doit être inferieur a 25% (LA <25) en Algérie .

*La dureté :

Elle est mesurée par une évaluation statique du double aspect de la résistance à l'attrition et aux chocs, elle est exprimée par le coefficient de la dureté relative globale, un ballast doit avoir pour notre cas, une DRG >18 (il varie selon la nature des traverses et du trafic). Le tableau ci-après détermine les DRG exigés pour ce ballast :

	Traverse en bois			Traverse en béton de L≥ 2.4m			Traverse en béton de L <2.4m		
	D R G			D R G			D R G		
	SOUHAI	MINI		SOUH	MINI		SOUH	MINI	
Groupe UIC1.6									
v>200				20	17	16			
V<200	17	14	13.5	17	15	14	18	15	14
Groupe UIC7.9		13.5	13		14	13			

Figure III.15. Le coefficient de la dureté relative globale :

*Résistance a la compression simple :

Les contraintes verticales transmises au ballast peuvent lui provoquer des ruptures, en effet, les granulats doivent présenter une résistance à la compression suffisante, elle est mesurée a partir d'un essai en laboratoire, en Algérie (RC > 14 KN/cm2, document SNTF).

Propriétés	Valeur Catégorie		Grandeurs mesurées
	Classe 1	Classe 2	
Granularité	mm	% massique	Passant
	63	100	
	50	70…99	
	40	30…65	
	31,5	1…25	
	22,4	0…3	
Grains fins	Aucune exigence		Passant
Fines	≤ 0,5% massique		Passant
Forme des grains	SI20 ≤ 20% massique		Indice de forme (SI)
Pierres longues	≤ 4% massique		Pierres longues > 100 mm
Résistance à la fragmentation	LARB16 ≤ 16	LARB24 ≤ 24	Coefficient Los Angeles (LA)
Résistance à l'usure	Aucune exigence		Coefficient Micro-Deval (MDE)
Durabilité	Granulats fragiles		Pétrographie
Durabilité	MS ≤ 3% massique		Valeur de sulfate de magnésium (MS)

Figure III.16. Tableau de prescriptions pour ballast de voie ferrée pour les classes 1 et 2 selon EN 13450.

III.8.2 La sous –couche :

C'est une couche d'adaptation interposée entre ballast et plate-forme, cette sous-couche est pente transversalement de 3% à 5%, elle peut être selon la nature de la couche de forme sous- jacente, mono ou multi couche, Elle a également des rôles multiples :

- Protection de la partie supérieure de la plate-forme contre l'érosion qui résulte, d'une part du poinçonnement opéré par les éléments de ballast d'autre part, de l'action des eaux zénithales.
- Protection des plats-formes contre les effets du gel.
- Meilleure réparation des chargements.

La sous couche comprend :

*Une couche sous ballast :

En grave propre bien graduée 0/31.50mm, comportant au moins 30% de concassée et compactée à100%, cette couche existe dans tous les cas même sur les plates –formes rocheuses. En effet elle a comme but :

- De retenir et rendre diffus les efforts transmis par le ballast à la plate –forme.
- D'empêcher l'infiltration de la partie inferieur du ballast.
- Contribuer à l'écoulement normal des eaux zénithales en les acheminant vers les cotes de la plate –forme.

La couche de « sous-ballast » doit-être conforme aux caractéristiques suivantes : Le pourcentage de fine c.-à-d., élément passant à 75mm doit être <15% Si le pourcentage de fine dépasse 10%, la limite de liquidité et de plasticité doit être <25, et 6% respectivement Coefficient d'uniformité :

$$\frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$$

*Une couche de fondation :

Les matériaux utilisés sont en général soit des sous-produits de carrière de ballast, du tout venant d'oued ou du gravier bien gradué compactée à 95% OPM.

Cette couche permet la circulation des engins bs de chantiers les matériaux doivent –être conformes aux spécifications particulières ci-après : -Sous-produit de carrière du ballast (0/31.5mm) propre bien gradué DRG>10.

-graves alluvionnaires et tout venant. -coefficient de courbure Cc doit être compris entre 1et 3

$$1 \leq C_C = \frac{D_{20}^2}{D_{10} + D_{60}} \leq 3$$

- limite de liquidité <35%
- indice de plasticité <10%
- coefficient d'uniformité doit-être supérieure à 4 :

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \geq 4$$

III.6.3.la plate-forme :

Constituée de sol rapportée (remblai) ou en place déblai) la partie supérieure de la plate-forme est aménagée en couche de forme, pente transversalement.

Dans le cas d'un remblai cette couche de forme est d'un sol de qualité meilleure ; son taux de compactage est de 95% OPM. Par fois la couche de forme est traitée aux liants hydrauliques.

Dans le cas d'un déblai, la couche de forme est obtenue par compactage du fond de fouille à 95% OPM sur épaisseur minimal de 30cm.

Le sol constituant la plate-forme doit remplir plusieurs fonctions :

- La réparation des charges reçues par la superstructure.
- l'évacuation des eaux de ruissellement et zénithales vers L'assainissement.
- La protection contre la pénétration du ballast par les limons et par les argiles provenant du sol.
- l'amortissement des vibrations résultant de la circulation des véhicules.
- rabattement des eaux souterraines.

Remarque :

Le sous-ballast, la couche de fondation et la couche anti- contaminants doivent être posés en pente transversale afin de mener l'eau de pluie vers l'assainissement.

- 4% pente normale.
- 3% pente posée dans les zones de désert.
- 5% pente posée dans les zones littorales.

III.9. Conclusion

La conception, la réalisation et la maintenance des projets d'envergure complexes comme les voies ferrées, nécessitent une connaissance fine du sol, de sa nature et de son comportement.

C'est pour cette raison cette étude géotechnique intervient dans toutes les activités de ce genre de projet. Elle peut aussi intervenir dans le choix du tracé, son objectif est base essentiellement sur la description géomorphologique et lithologique, l'interprétation des mouvements gravitaires, l'estimation des tassements et enfin le dimensionnement des assises.

Le bon dimensionnement soit de différents éléments du profil en travers ou bien la couche d'assise tout en respectant les normes permettant à la voie de supporter et transmettre la charge provoquée par le matériel roulant, et garantir une longue durée de vie .

Chapitre 04

Modalisation numérique de la structure d’assise

IV. Introduction

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur (méthode des différences finies et méthode des éléments finies) a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et générales, fondées sur un certain nombre de modèles rhéologiques et d'algorithmes de résolution des divers aspects du comportement des sols.

Ces modèles, reposant sur des approches élastiques non-linéaires ou sur des approches élastoplastiques, permettent de décrire assez correctement le comportement des sols.

Quant aux algorithmes de résolution, leur fiabilité et leur performance dépendent surtout de la méthode de calcul utilisée et des critères de convergence fixés.

Les deux logiciels de calcul utilisés dans cette étude et présentés ci-après sont fondés sur ces principes et sont connus pour avoir donné par ailleurs des résultats satisfaisants.

Leur choix a été motivé par leur disponibilité et leur souplesse, ainsi que par leur performance du fait qu'ils se prêtent bien aux objectifs fixés pour l'analyse de la stabilité des pentes sous sollicitations statiques (poids propre et surcharges) ou dynamique (séismes, matériel roulant).

Le but de ce chapitre est de faire une étude numérique d'un remblai ferroviaire sur sol multicouche avec les logiciels PLAXIS V8 et GEOSTUDIO V2012.

Le remblai est de 12m de hauteur, dont les talus latéraux ont une pente "1/3". Ce remblai doit être construit sur une couche d'alluvions + Tuf consolidé grisifié de 3 m d'épaisseur, de alluvions d'oued de 2 m et argile limono-cailleuteuse de 5 m.

On a adopté un phasage de la construction par couches du remblai car cette approche permet de tenir compte de la technique de construction, en installant des couches successives de sol (tassement).

Le calcul par éléments finis s'effectue alors en plusieurs étapes en suivant au plus près la chronologie des travaux et les techniques utilisées.

Le planning de chargement consistera à mettre en œuvre le remblai en plusieurs phases successives et chacune correspond à la construction d'une hauteur (précise hi=2 m), avec des périodes d'attente pour chaque phase permettant d'obtenir une consolidation suffisante pour qu'à chaque palier la résistance au cisaillement atteinte conduise à un coefficient de sécurité satisfaisant.

IV.1. Logiciel Plaxis :

IV.1.2 Présentation de Plaxis :

Le code éléments finis Plaxis représente certainement un optimum actuel sur le plan scientifique et pratique.

Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élastoplasticité (avec prise en compte des pressions interstitielles, doté des méthodes de résolution, éprouvés, ainsi que de procédures de chois automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti.

Bien que très fiable sur le plan numérique, de point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure.

Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter.

L'ensemble des options simplifiées (initialisation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller au but (prévoir le comportement d'un ouvrage).

IV.1.2. Fonctionnement du Logiciel :

Définition des données (Input) :

Pour réaliser une analyse suivant la méthode des éléments finis avec Plaxis, on devra créer un modèle numérique et spécifier les propriétés des matériaux et les conditions aux limites. Ceci se fait à l'aide de programme d'entrée des données (Input) :

Hypothèses et géométrie :

En pratique, pour des remblais qui sont relativement longs, une analyse en déformation plane d'une section transversale courante de l'ouvrage est appropriée. Donc le remblai sera analysé en déformations planes.

Caractéristiques des matériaux

Le sol de fondation compressible et le remblai sont supposés avoir un comportement décrit par le modèle de Mohr-Coulomb.

On a deux différents types de comportement de sol :

· **Comportement drainé**

Aucune surpression interstitielle n'est générée

· Comportement non drainé

Permettre la génération complète des surpressions interstitielles.

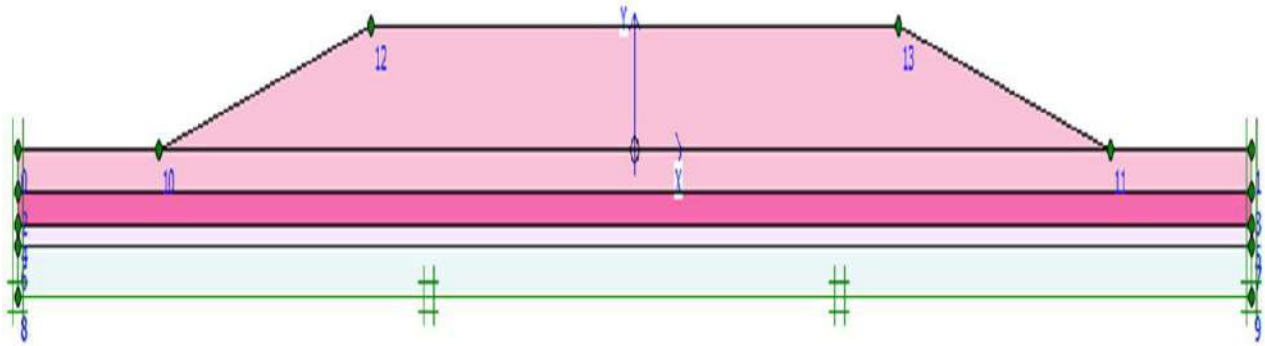


Figure IV.1 : Modèle géométrique du projet section remblais.

Génération le maillage : l'opérateur peut bien entendu de spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci importe de détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds, avec un contrôle permanent à l'écran.

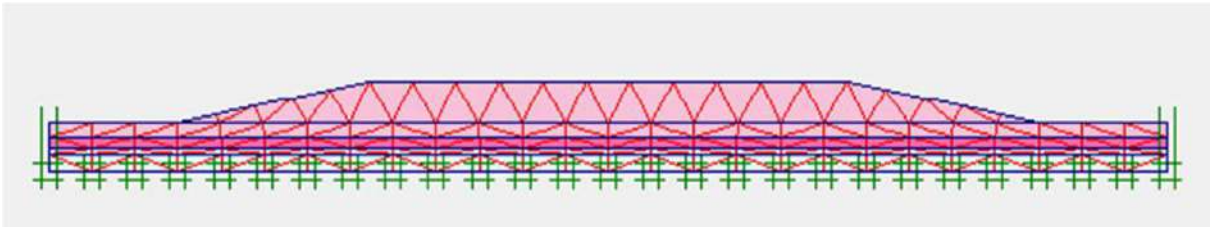


Figure IV.2 : Maillage du projet Saida-El bayadh section

Les conditions aux limites en déplacement : si celles-ci sont complexes, l'ingénieur devra spécifier les subtilités d'une manière précise (le vecteur déplacement est nul à la base du domaine étudié, et le vecteur déplacement horizontal est nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec un contrôle immédiat du résultat à l'écran.

Les contraintes initiales dues au poids des terres : peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre.

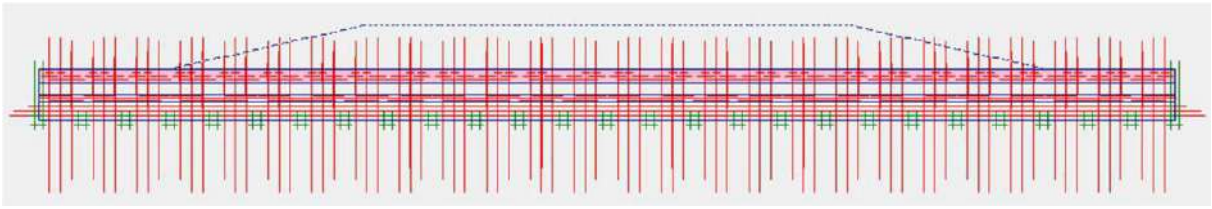


Figure IV.3 : Génération des contraintes effectives initiales

Les pressions interstitielles : ont été l'objet d'un soin particulier dans Plaxis pour qui souhaite faire un calcul précis du champ de pressions interstitielles, Mais bien sûr, cette opération demande du temps (d'opérateur et de machine).

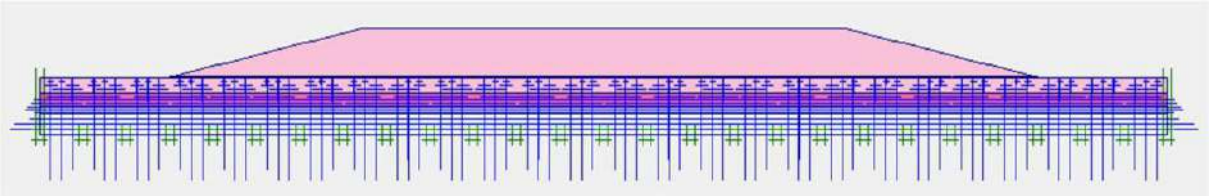


Figure IV.4 : Génération des surpressions en présence de la nappe phréatique

Les calculs (Calculation) :

Après la définition du modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués.

Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type des calculs à réaliser ainsi que les cas de chargement ou les étapes de construction qui seront à appliquer. On opère grâce au programme de

Calcul (*Calculation*).

Plaxis permet d'effectuer différents types de calculs aux éléments finis. Le programme de calcul traite l'analyse des déformations et permet de réaliser un calcul plastique (*Plastic calculation*), une analyse de consolidation (*Consolidation analysis*), un calcul de coefficients de sécurité (*Phi-c reduction*) ou un calcul dynamique (*Dynamic calculation*).

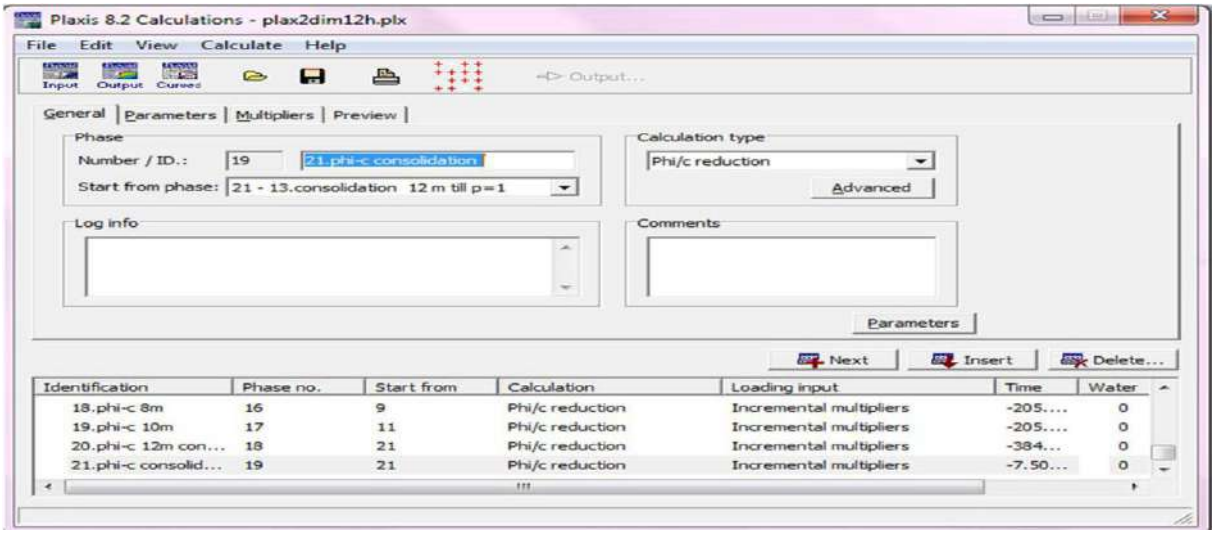


Figure IV.5 : Fenêtre des phases de calculs

Analyse de la sécurité

Le coefficient de sécurité (*Phi-c réduction)* : c'est une notation très importante en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une qualité considérable de données, supposant une réduction proportionnelle de la résistance mécanique des matériaux impliques, ce qui ne constitue pas un état réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élastoplastiques, qui conduit à l'évaluation du coefficient de sécurité dans Plaxis.

 Résultats (Output)

Nous nous intéressons aux résultats suivants :

- les déplacements verticaux maximaux (*Uy*) max, pour les différentes phases de calcul.
- les déplacements horizontaux maximaux (*Ux*) max, pour les différentes phases de calcul.
- les surpressions interstitielles maximales "*Extrême Excès Pore Pressures*" (*EEPP*) ou (*pexcess*) max.
- le coefficient de sécurité *FS* (Σ*Msf*), pour les différentes phases de calcul.

 Courbe (Curves) :

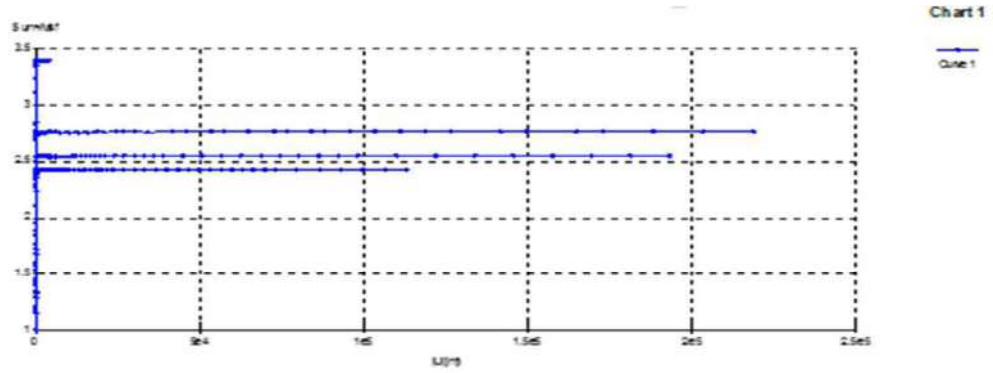


Figure IV.6 : exemples de courbes du facteur de sécurité en fonction du déplacement

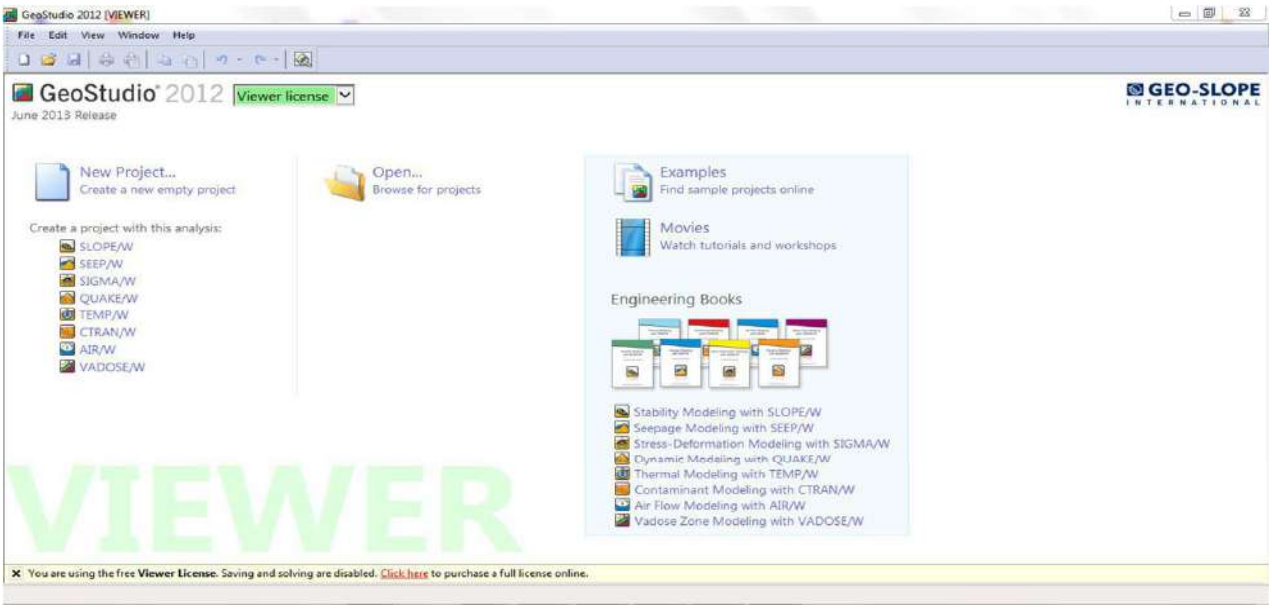
PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifiques et pratiques en l'analyse des problèmes élastiques, élastoplastiques, élastovisco-plastiques en 2D (bidimensionnel) en déformations planes ou 3D (tridimensionnel) en déformations axisymétriques.

IV.2 Le Logiciel Geostudio :

IV.2.1. Présentation du Logiciel :

Geostudio est un logiciel de calcul géotechnique qui permet de traiter les différents problèmes du sol comme le glissement des terrains, le tassement, la consolidation, les

infiltrations des eaux dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique. Plusieurs programmes sont intégrés dans la fenêtre générale du logiciel :



FigureIV.7:FenêtredulogicielGeostudio2012

SEEP/W : Permet de calculer les infiltrations des eaux (Par la méthode des éléments finis).

SIGMA/W : Permet d'analyser les problèmes de la relation contraintes –déformations (Par la méthode des éléments finis).

QUAKE/W : Permet de définir le comportement d'un terrain sous l'effet d'un séisme (Par la méthode des éléments finis).

TEMP/W : Permet d'analyser les problèmes géotechniques du sol (Par la méthode des éléments finis). Et autres logiciels.

SLOPE/W : Permet de calculer le coefficient de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyses classiques, et c'est le programme qui nous intéresse dans la présente étude.

Nous avons choisi **SIGMA/W et SLOPE/W**

Le programme de calcul **SLOPE** est un programme d'analyse de la stabilité des pentes, basée sur la théorie d'équilibre limite qui consistes à respecter les deux règles de la stabilité statique, c'est-à-dire il faut satisfaire les conditions d'équilibres des moments et d'équilibre des forces.

Cette analyse consiste à calculer un facteur de sécurité en visualisant les résultats graphiques du volume instable correspondant.

Les méthodes de calcul du facteur de sécurité intégrées dans **SLOPE** sont la méthode de Fellenius, de Morgenstern-Price, de Jumbo et celle de Bishop simplifiée, et enfin" la méthode des éléments finis" qu'on peut le trouver dans la partie logique " SIGMA/W ".

Elles permettent de calculer un coefficient de sécurité vis-à-vis d'un type de rupture bien défini. Le modèle géométrique est subdivisé en tranches verticales en 2D. Il exécute plusieurs méthodes de recherches automatiques du centre de rotation de la surface de glissement potentiel jusqu'à atteindre le plus faible coefficient de sécurité.

Ainsi que, **SIGMA / W** utilise une formulation basée sur des éléments finis pour effectuer des analyses de contrainte et de déformation des structures terrestres.

Sa formulation complète contrainte-contrainte permet d'analyser des problèmes simples et très complexes.

SIGMA / W peut effectuer une analyse de déformation élastique linéaire simple ou une analyse de contrainte élastique non linéaire hautement sophistiquée, qui peut impliquer des interactions sol structure, contrainte couplée et réponse à la pression interstitielle, et des considérations de stabilité basées sur le stress.

Les nombreux modèles de sols constitutifs vous permettent de représenter une large gamme de sols ou de matériaux structurels. En outre, SIGMA / W peut modéliser la génération et la dissipation de la pression interstitielle dans une structure de sol en réponse à des charges externes. Ces caractéristiques permettent à SIGMA / W d'analyser presque tous les problèmes de contraintes ou de déformations que vous rencontrerez dans les projets d'ingénierie géotechnique, civile et minière.

IV.2.2 Le Fonctionnement du Logiciel :

Le présent logiciel comme tous les autres programmes de calcul sert à fournir des résultats issus d'un nombre défini des paramètres, donc il est nécessaire de suivre les étapes suivantes pour l'achèvement de l'opération de calcul :

- ✓ **DEFINE:**

Cette étape est très importante car on va définir le problème et introduire les différentes données spécifiques au problème en vigueur, Créer un espace de travail problématique et des propriétés d'analyse, créez une analyse SIGMA / W et configurez l'espace de travail du problème. Choisissez le type d'analyse, tel que la contrainte In situ, la redistribution des

contraintes, la charge / déformation, la pression couplée / la pression de l'eau interstitielle, le changement de volume et la déformation dynamique.

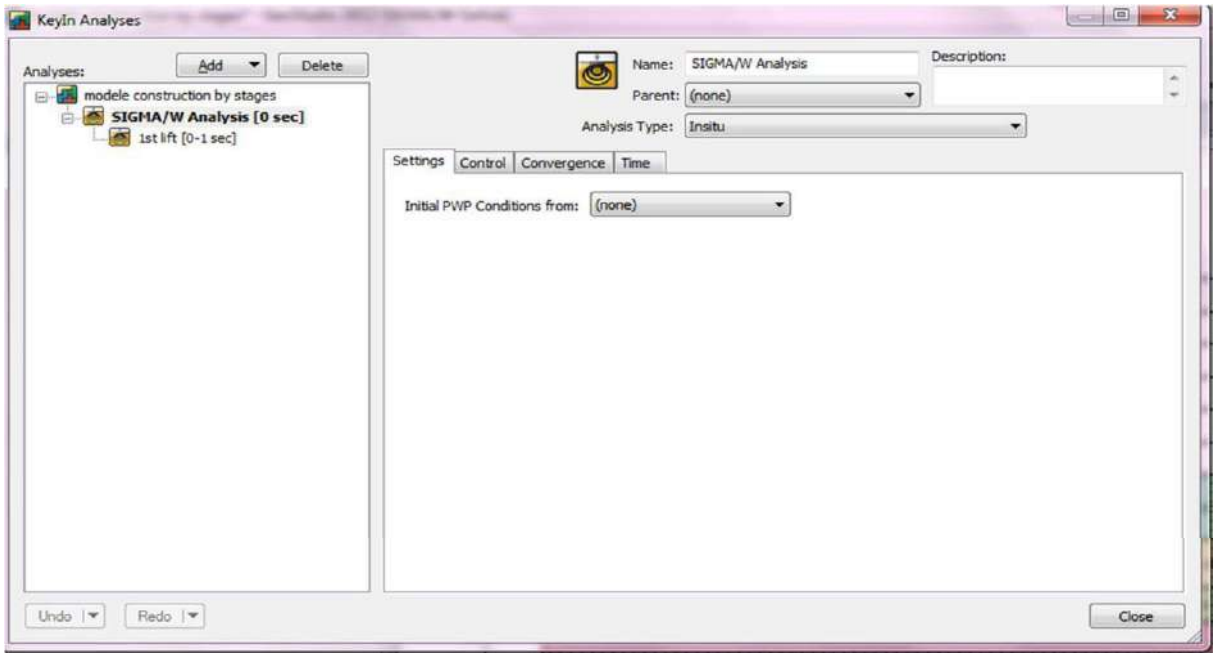


Figure 3.8 : Fenêtre d'analyse du module SIGMA / W

✓ **SET :**

Permet la délimitation de la surface du travail, la définition de l'échelle, la définition des réseaux, la détermination du zoom, la fixation d'axes.

✓ **KEYIN :**

Permet le dessin des régions de domaine à l'aide d'outils de dessin CAO, y compris les polygones et les régions circulaires, l'importation de coordonnées, les éléments géométriques copiés-collés, le retour de longueur et d'angle, la division et la fusion de régions.

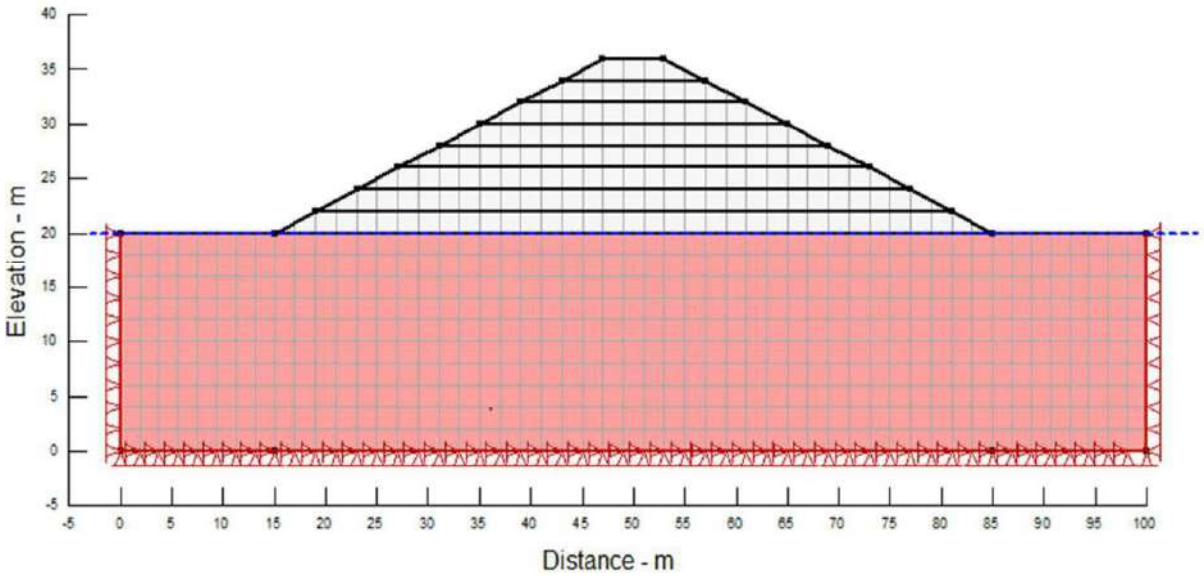


Figure IV.9 : Les régions de domaine et le niveau de la nappe phréatique.

Permet d'introduire automatiquement à l'aide des tableaux les paramètres géométriques de la pente (coordonnées et couches), les caractéristiques mécaniques des déférentes couches constituant le talus, des conditions complémentaires nécessaires pour le calcul, le niveau de la nappe, de sélectionner les déférentes méthodes de calcul, les surcharges, l'effort sismique confortement

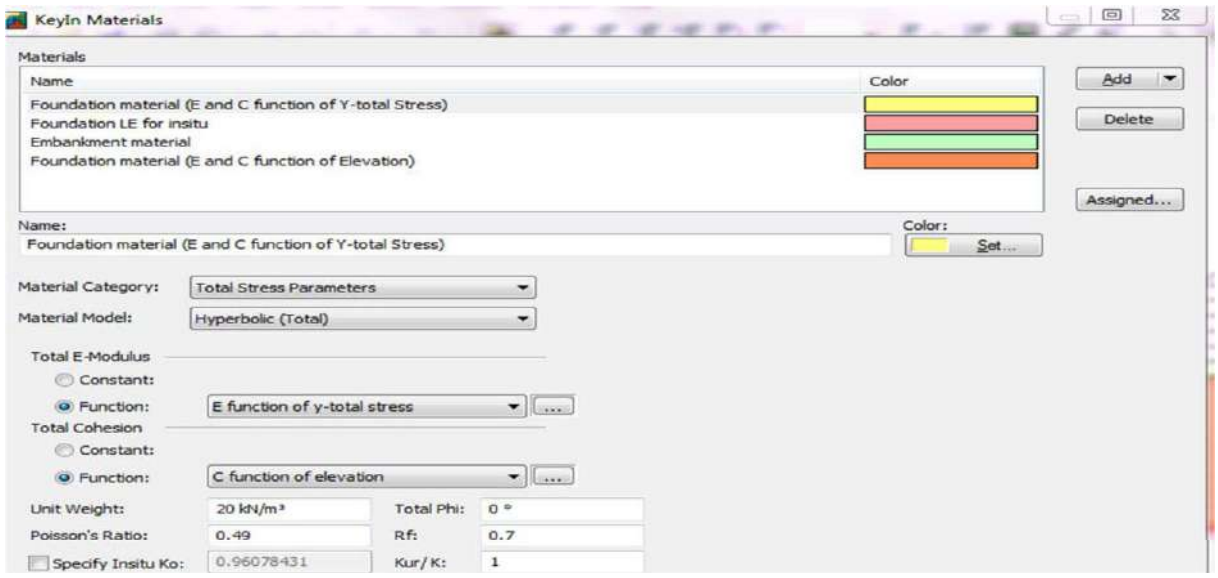


Figure IV.10 : les propriétés des matériaux du domaine.

✓ **DRAW:**

· Le dessin du rayon de la surface de rupture

· Le dessin des réseaux de la surface de rupture

SLOPE/W permet de calculer le coefficient de sécurité du talus

Modify:

Cette instruction permet aux utilisateurs de rajouter, éliminer, supprimer et modifier des objets dans le problème.

Sketch :

· La réalisation de l'esquisse du problème

· Etiquetage du sol

· Rajout d'un titre d'identification du problème

· Eclaircir les ténèbres d'identification

✓ **SOLVE :**

C'est l'étape de résolution du problème, à l'aide des méthodes classiques et la méthode des éléments finis et a partir des données introduites, on détermine le coefficient de sécurité Fs.

Lorsque le problème est complètement défini, démarrez le processus d'analyse dans la fenêtre

Solve Manager. Le gestionnaire de solvabilité affiche la progression de la solution, vous permettant d'annuler ou d'arrêter / redémarrer si nécessaire.

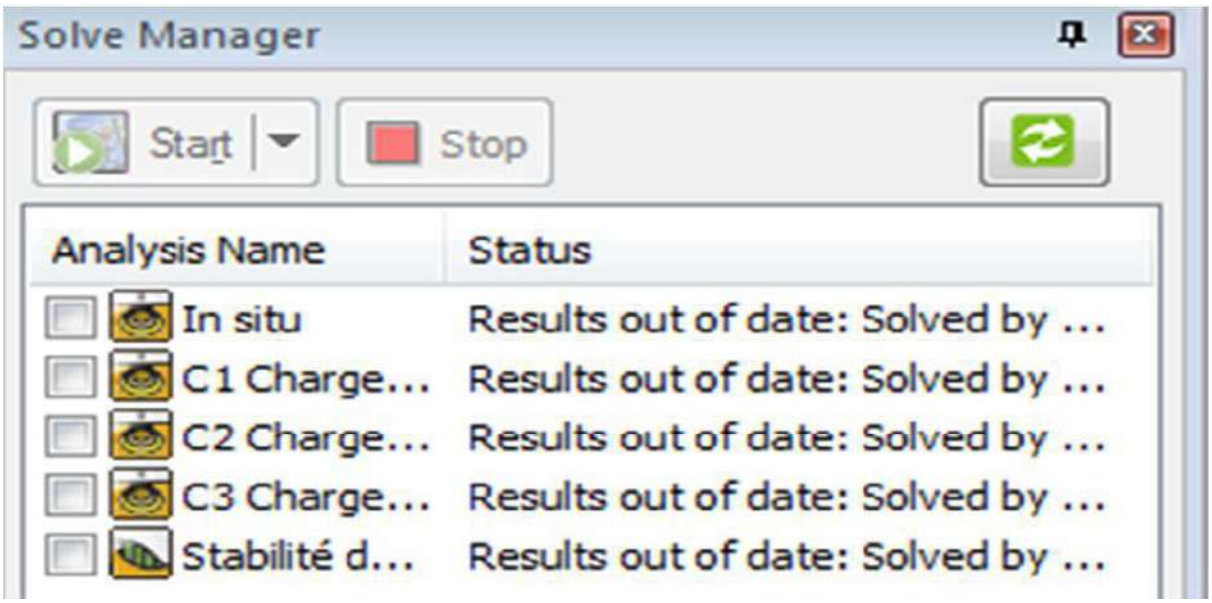


Figure IV.11 : Fenêtre du Solve Manager.

 RESULTATS :

C'est l'étape chargée de traduire et afficher les différents résultats sous une forme graphique ;

IV.2.2 Spécifité de Sigma/W « Séquençage de construction par étapes » :

SIGMA / W peut être utilisé pour simuler des séquences ou des étapes de construction. Dans la terminologie des éléments finis signifie ajouter ou supprimer des éléments du maillage.

Dans SIGMA / W, la terminologie est activée ou désactivation des régions. Le maillage reste le même pour toutes les analyses mais les régions peuvent être activées ou désactivées simuler, par exemple, le placement du remblai ou l'enlèvement du sol pour créer une excavation.

 CONCEPTS DE BASE DE SIGMA/W :

SIGMA / W peut enchaîner une série d'analyses. Toutes les analyses peuvent être séquentielles en attribuant analyse une durée dans le temps pour former une ligne de temps continue. L'heure de début d'une analyse est l'heure de fin de l'analyse précédente.

Les régions sont activées ou désactivées pour chaque analyse, en affectant un matériau à une région où en supprimant matériel d'une région. Les conditions aux limites sont uniques à chaque analyse.

Les éléments structurels sont ajoutés en attribuant des propriétés de poutre ou de barre à une ligne ou sont supprimés en supprimant les propriétés du faisceau et de la barre à un stade particulier.

 PLACEMENT DE REMPLISSAGE :

Considérons le cas de la construction d'un remblai en plaçant le remblai dans une série d'ascenseurs.

Le diagramme suivant (Figure IV.13) montre un cas typique.

Le remplissage sera placé dans six ascenseurs. De plus, l'intention est de commencer avec un état de stress connu dans la fondation avant de placer tout remplissage. Donc, un total de 5 analyses est requis comme indiqué par l'arborescence de la Figure IV.14.

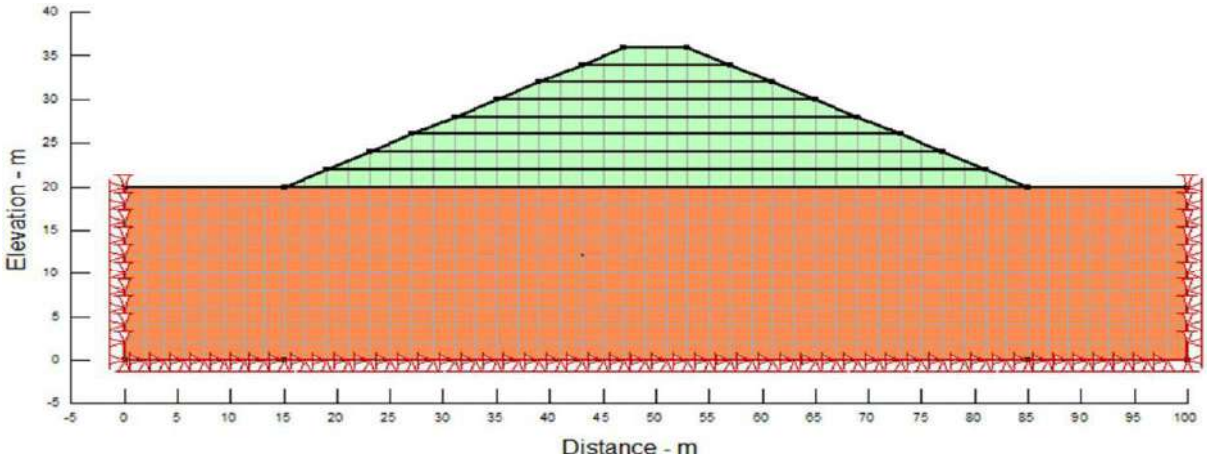


Figure IV.12: Illustration du placement de remblai par des ascenseurs.

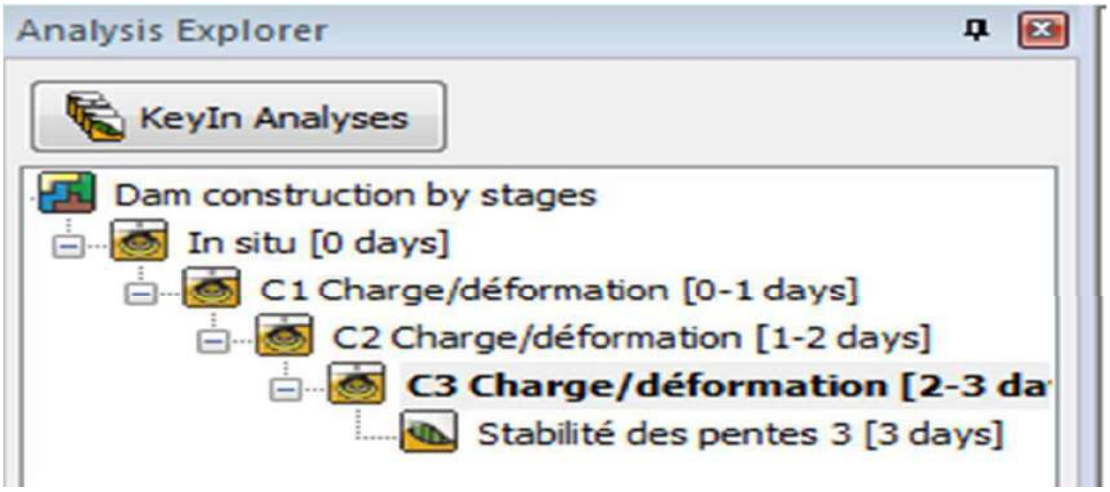


Figure IV.13 : Vue de l'arbre d'analyse

La première analyse ou étape est d'établir l'état de contrainte in situ. Ceci est suivi de huit analyses où Chaque analyse d'ascenseur représente le placement d'un mètre de remplissage.
Ceci est une **analyse de contrainte totale** donc pas de temps "réel" est impliqué dans les calculs, mais chaque l'analyse est donnée une unité de temps afin que les résultats puissent être tracés dans toutes les analyses.

Dans la terminologie SIGMA / W, le "parent" de ascenseur 1 est l'étape In situ ou inversement "l'enfant" de l'In situ le stade est ascenseur 1.
La signification algorithmique de ceci est que le " enfant " peut toujours obtenir ou hériter de ses initiales conditions du "Parent".

Ainsi, dans le contexte de la formulation incrémentale SIGMA / W, chaque analyse est un incrément et les incréments sont ajoutés aux conditions initiales.

Les trois figures suivantes montrent la configuration pour les trois premières analyses.

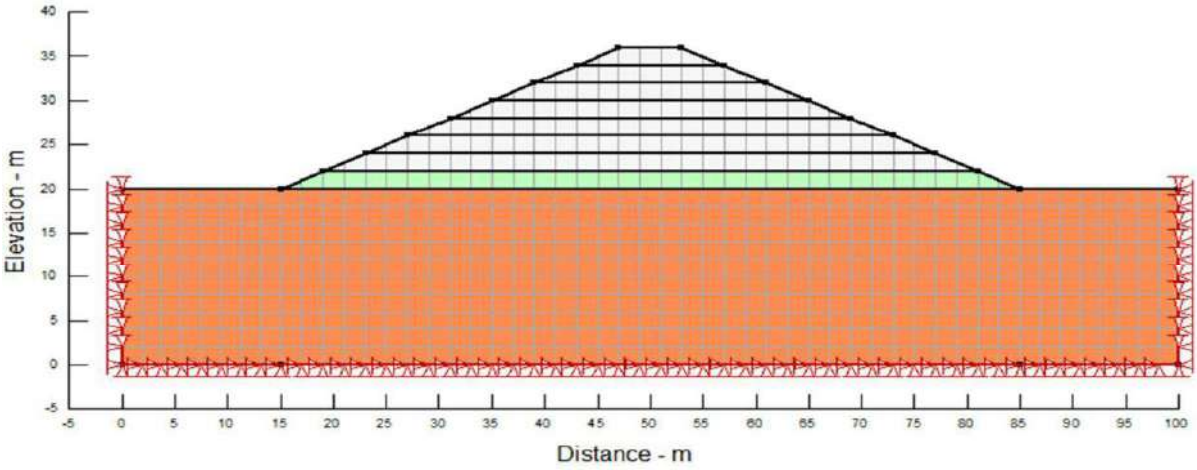


Figure IV.14 : Configuration pour la première couche (ascenseur 1).

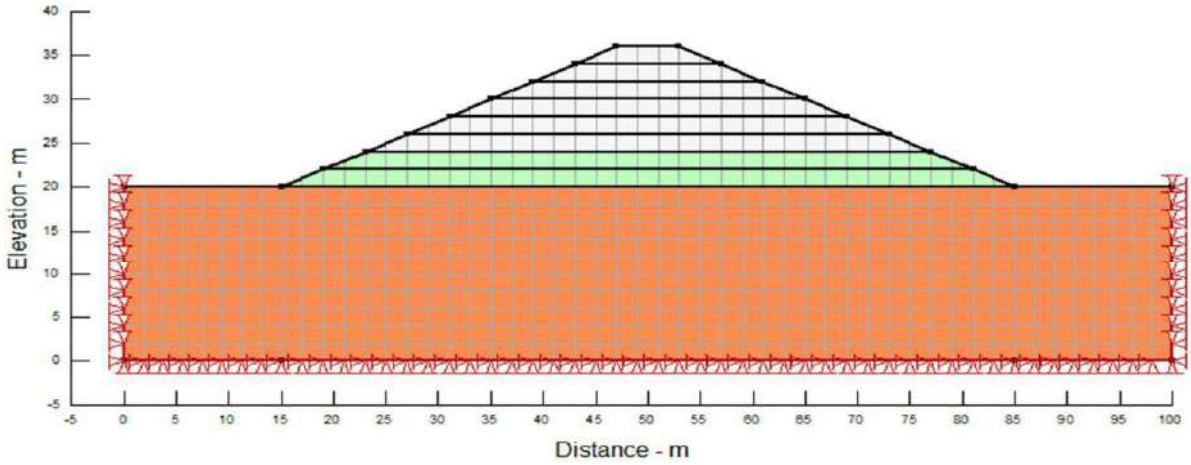


Figure IV.15 : Configuration pour la deuxième couche (ascenseur 2).

IV.3 Analyse de la stabilité des remblais application sur notre projet :

Pour ce qui concerne les remblais, les analyses de stabilité ont été effectuées sur les sections les plus hautes des remblais qui se trouvent dans le tracé de projet.

Pour l'analyse de la stabilité on a considéré les sections préliminaire de référence, construits avec talus de 6 m de pente 1v/3h sur toute la hauteur, avec des banques 2 m larges. On a considéré aussi le décapage sur 0,20 mètres d'épaisseur au-dessous du remblai.

En particulier on a analysé le tronçon de remblais le plus haut.

Le terrain végétal considéré pour les vérifications de stabilité des talus des déblais, n'ont pas été considéré pour les vérifications de stabilité des remblais puisque il sera emporté par les opérations de décapage.

En respectant NF-P 11300 (Guide Technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme - septembre 1992) qui prescrit la nature et l'état des sols des matériaux utilisés pour les remblais, pour la couche de fondation et pour celle de sous-ballast au-dessus du remblai même, ainsi que la méthodologie de réalisation de cette ouvrage, on a assumé les suivants paramètres géotechniques:

Tableau IV.1 : paramètres géotechniques de la structure d'assise.

Matériaux	γ [KN/m3]	c' [Kpa]	ϕ' [°]	γм	c'/γм [Kpa]	ϕ/γм' [°]
Remblai	20	12,5	35	1,25	10	28
Couche de fondation	20,2	15	36	1,25	12	28,8
Sous-ballast	20.5	20	37	1,25	16	29,6

Nous avons considéré dans ce cas la présence du caniveau en béton et une couche de terrain végétale, pour lesquels ils ont été assumé les paramètres du tableau de suite:

Tableau IV.2 : paramètres géotechniques caniveau+terre végétale.

Matériaux	γ [KN/m3]	c' [Kpa]	ϕ' [°]
Caniveau en béton	25	500	50
Terrain Végétale	20	15	30

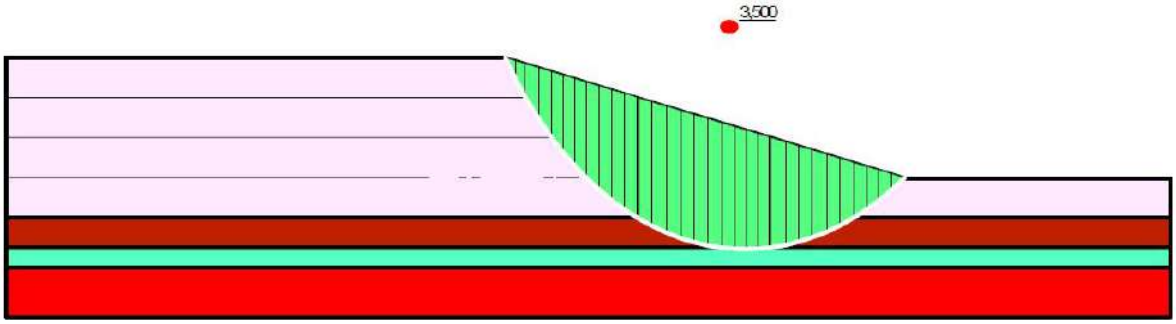
IV.3.1Calculs préliminaires de la stabilité du remblai à l'aide du logiciel GEOSTUDIO :

Nous avons examiné le calcul de la stabilité sismique du remblai par les méthodes de calcul à l'équilibre limite en utilisant le module SLOPE/w du logiciel GEOSTUDIO version 2012.
Plusieurs types de calcul de la stabilité du remblai ont été examinés :

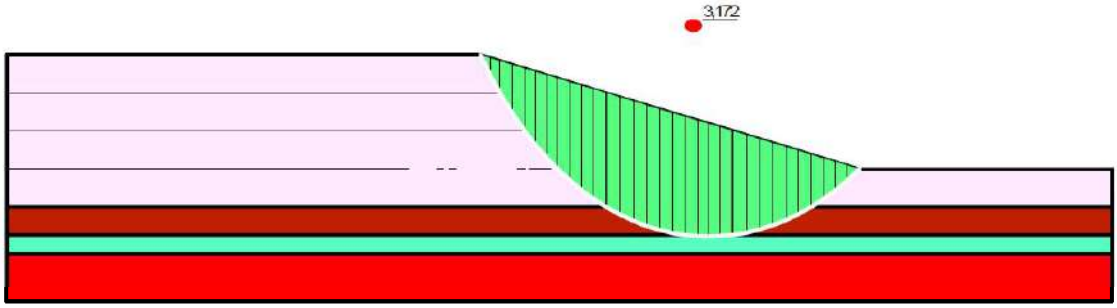
- Le premier calcul : remblai sous chargement gravitaire.
- Le deuxième calcul : remblai sous chargement gravitaire et effet de la nappe d'eau.
- Le troisième calcul : remblai sous chargement gravitaire après nous aurons le chargement de l'essieu 25 T, effet de la nappe et l'effet du séisme.

IV.3.2- Calcul sous chargement gravitaire :

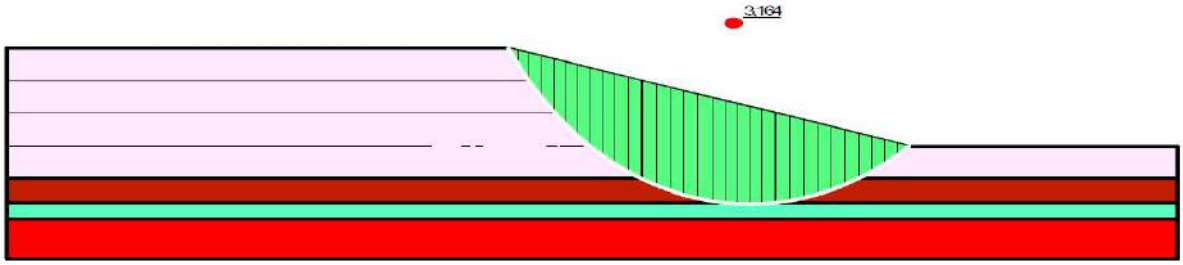
Une seule phase de calcul étant définie, après introduction de la géométrie, les matériaux, la Surface de glissement le calcul est lancé en choisissant une méthode de calcul à l'équilibre limite tel que Bishop, Ordinaire (Fellenius), Spencer, Janbu, Morgenstern-Price …
La position du cercle de rupture critique et la valeur du facteur de sécurité par les trois méthodes sont affiché sur la figure IV.7 ci-dessous.



A-Méthode de Bishop



B-Méthode de Fellenius.



C-Méthode de Janbu.

Figure IV.16 : Cercle de rupture critique et valeur du FS sous chargement gravitaire

Les résultats du calcul sont affichés pour une méthode, le passage d'une méthode à l'autre est très simple, les valeurs du facteur de sécurité sont encadrées dans le tableau IV.3.

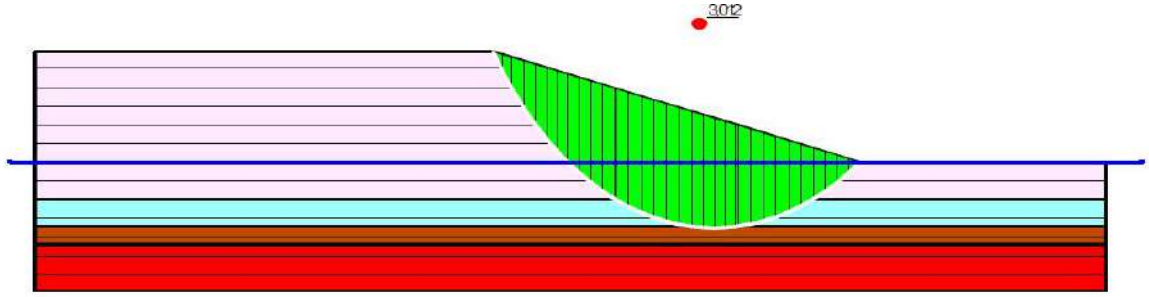
Tableau IV.3 : valeurs du facteur de sécurité sous chargement gravitaire.

Méthode	Fellenius	Bishop	Janbu
Valeur de FS	3.17	3.5	3.16

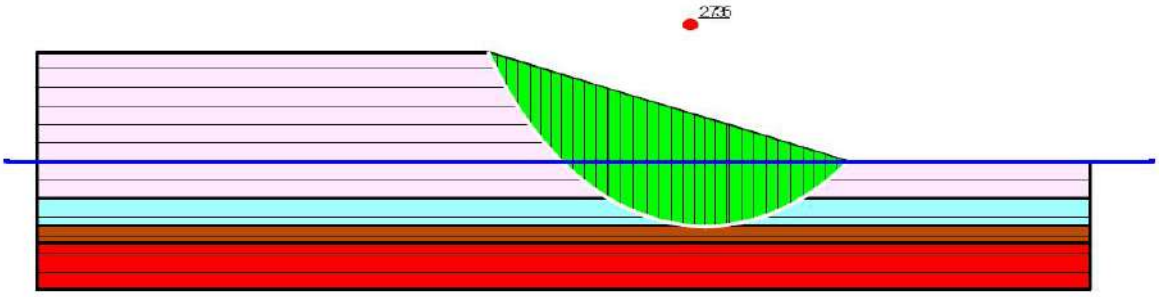
Sous chargement gravitaire le talus est très stable selon les trois méthodes implémentées dans le logiciel Geostudio (Fellenius, Bishop et Janbu).

IV.3.3- Calcul sous chargement gravitaire et nappe phréatique :

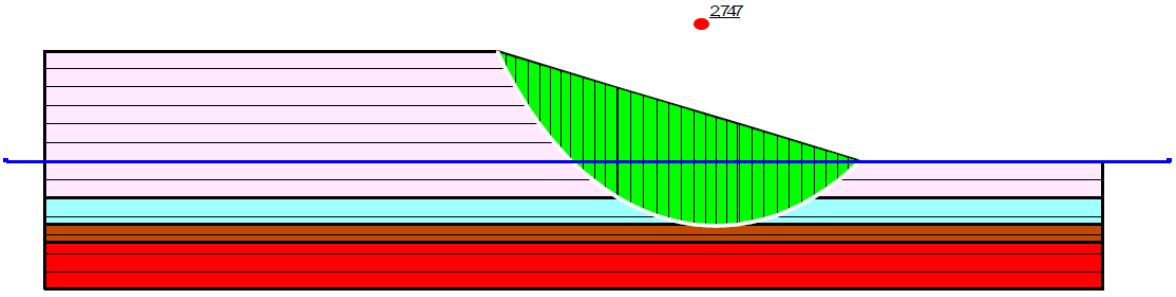
En présence de la nappe phréatique située au niveau du sol, le calcul se fait en une seule phase, la position du cercle de rupture critique et la valeur du facteur de sécurité par les trois méthodes sont affichés sur la figure IV.17 ci-dessous.



A-Méthode de Bishop



B-Méthode de Fellenius.



C-Méthode de Janbu.

Figure IV.17 : Cercle de rupture critique et la valeur du FS sous G et nappe

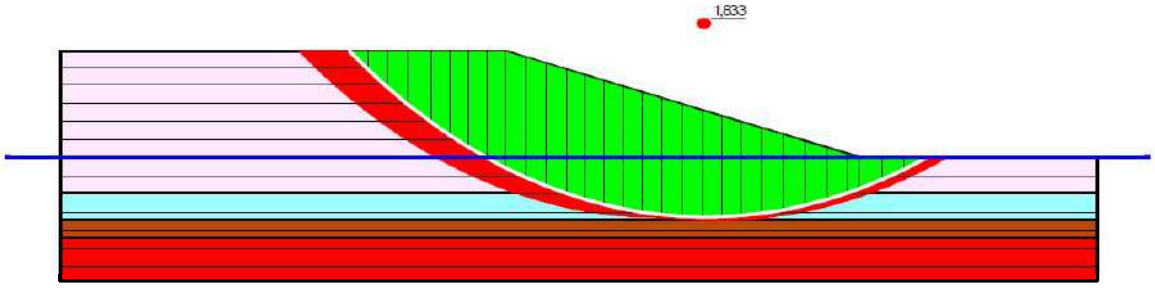
Les valeurs du facteur de sécurité en présence de la nappe au niveau 0.0, sont encadrées dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Valeurs du facteur de sécurité sous chargement 25T et nappe d'eau.

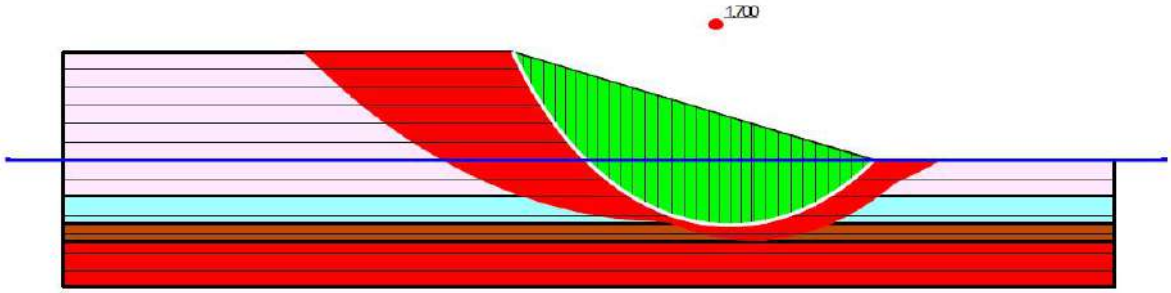
Méthode	Fellenius	Bishop	Janbu
FS	2.73	3.01	2.75

4.6.3- Calcul sous chargement gravitaire, 25 T, nappe phréatique et séisme maximal :

Sous effet combiné gravitaire de chargement 25 T, de la nappe phréatique située au niveau du sol et d'un séisme d'intensité maximale calcul se fait en une seule phase, la position du cercle de rupture critique et la valeur du facteur de sécurité par les trois méthodes sont affichés sur la figure IV.18 ci-dessous.



A-Méthode de Bishop



B-Méthode de Fellenius.

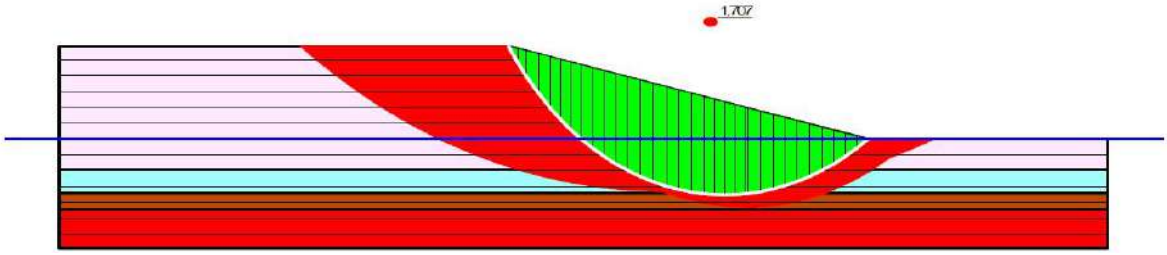


Figure IV.18 : Méthode de Janbu Cercle de rupture critique et la valeur du facteur de sécurité sous effet combiné

Les calculs sous l'effet combiné du chargement gravitaire et 25 T, du séisme et de la nappe d'eau sont encadré dans le tableau IV.5 :

Tableau 4.5 : Valeurs de FS sous effet combiné du chargement gravitaire, 25 T, séisme et de la nappe

Méthode	Fellenius	Bishop	Janbu
FS	1.70	1.83	1.71

Comparaison Des Résultats de méthodes d'équilibre limite *:*

Les résultats du calcul par les trois méthodes d'équilibre limite (MEL) à savoir Fellenius Bishop et Janbu sont encadrés dans le tableau IV.6 ci-dessous :

Tableau IV.6 : Récapitulation des résultats des valeurs du Facteur de Sécurité par MEL

Méthode du calcul	Fellenius	Bishop	Janbu
Sous G	3.17	3.50	3.16
Sous G+ Nappe	2.73	3.01	2.75
Sous G+25 T+ Nappe+Séisme	1.70	1.83	1.71

Conclusion :

Selon les résultats du calcul par les trois méthodes d'équilibre limite (MEL) on constate que :

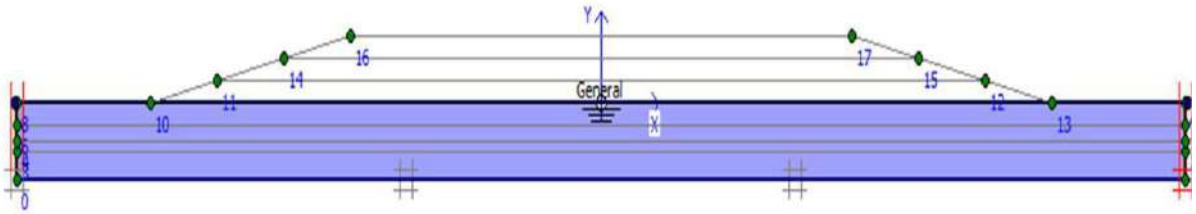
- les méthodes de FELLENIUS et JANBU donnent les mêmes résultats ;
- la méthode de Bishop surestime les valeurs de 6 à 10% par rapport à celles de FELLENIUS et JANBU.

IV.4- Calculs détaillés de la stabilité du remblai à l'aide du code Plaxis

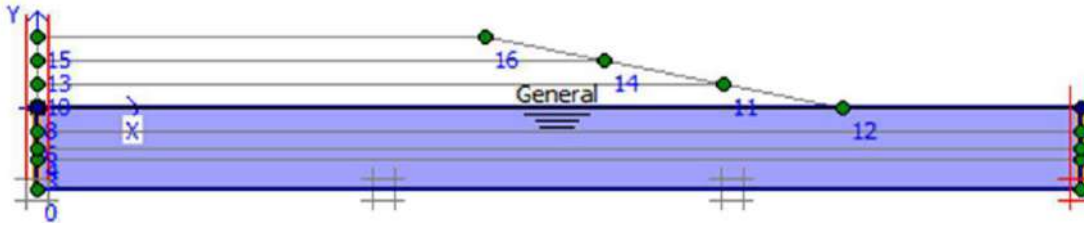
IV.4.1- Profil étudié :

Dans le but de bien mener notre étude et de confirmer les résultats précédents, on a repris les calculs sous effet combiné chargement gravitaire, 25 T de l'essieu, nappe phréatique située au niveau du sol et un séisme d'intensité maximale (kh=0.125g), en utilisant un logiciel en éléments finis, qui est le code PLAXIS.

Le profil du remblai étudié est représenté sur la figure IV.19 ci-dessous :



A-Profil du remblai complet



b-Semi profil du remblai

Figure IV.19 : Profil du remblai étudié par le code PLAXIS

IV.4.2- Principes du calcul :

Le calcul se fait en en partant d'un état initial, suivi de l'activation par étape de 03 couches de remblai de 4m de hauteur chacune puis une phase de dissipation totale des pressions interstitielles et enfin une phase de réduction des caractéristiques (φ et c) de cisaillement pour obtenir le facteur de sécurité en présence ou sans séisme.

Les caractéristiques de chaque phase de calcul sont présentées sur la figure IV.20 ci-dessous :

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input
Initial phase	0	0	N/A	N/A
Couche1 de remblai	2	0	Consolidation analysis	Staged construction
Attente C1	3	2	Consolidation analysis	Staged construction
Couche2 de remblai	4	3	Consolidation analysis	Staged construction
Attente C2	5	4	Consolidation analysis	Staged construction
Couche 3 de remblai	6	5	Consolidation analysis	Staged construction
Dissipation totale	7	6	Consolidation analysis	Minimum pore pressure
Stabilité Mécanique sans seisme	8	7	Phi/c reduction	Incremental multipliers
Effet Combiné	9	7	Plastic analysis	Total multipliers
Stabilité sous effet combiné	10	9	Phi/c reduction	Incremental multipliers

Figure IV.20 : Caractéristiques de chaque phase de calcul sous PLAXIS

IV.4.3- Résultats des calculs :

IV.4.3.1- Déplacements au cours du remblaiement par couche :

Les déplacements verticaux, horizontaux et totaux après chaque étape de remblaiement de quatre mètres de hauteur chacune, au-dessous du centre du remblai sont encadrés dans le tableau IV.7 :

Tableau IV.7 : Déplacements à la fin de chaque couche de remblaiement

	Couche de remblaiement			
	C1(+4m)	2(+8m)	C3 (+12m)	
Déplacement	Sans séisme			Sous séisme
Vertical	0,42	0,96	2,32	3,57
Horizontal	0,22	0,38	0,43	1,48
Total	0,43	0,98	2,32	3,57

Les déplacements totaux sous effet combiné chargement gravitaire, nappe phréatique et séisme maximal sont représentées sur la figure IV.21.

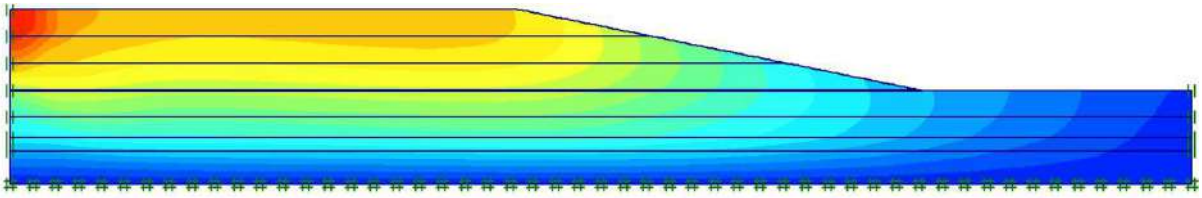


Figure IV.21 : Déplacements totaux sous effet combiné

IV.4.3.2- Facteur de sécurité au glissement après remblaiement total :

Après remblaiement totale le facteur de sécurité au glissement sous effet du chargement Gravitaire et la nappe phréatique est de 2.74.

Sous effet combiné chargement gravitaire, 25 T, nappe phréatique et séisme maximal le facteur de sécurité au glissement se réduit à 1.47.

Les lignes de rupture du glissement du talus, sous effet combiné chargement gravitaire, nappe phréatique et séisme maximal sont représentées sur la figure IV.22.

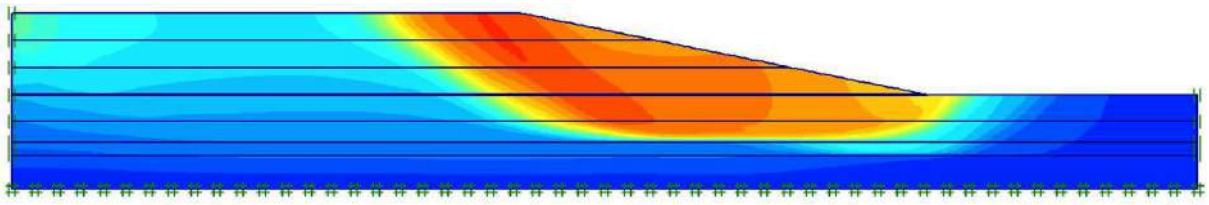


Figure IV.22 : Position des lignes de rupture sous effet combiné

IV.4.4- Etude paramétrée :

On a fixé la hauteur du remblai à douze mètre, et on a fait varier le facteur d'accélération sismique horizontale autour des valeurs correspondantes aux différents types d'ouvrage de la zone sismique dans laquelle est situé notre tronçon d'étude.

Les résultats de calcul du facteur de sécurité sous effet combiné "Chargement gravitaire, 25T, nappe et séisme" sont encadrés dans le tableau IV.8.

TableauIV.8:Valeurs.du.FS.en.fonction.du.Facteur.d'accélération.horizontale.

k_h	0	0.05	0.075	0.10	0.125	0.15	0.20	0.25
FS	2.74	2.02	1.81	1.61	1.47	1.33	1.10	collapses

Le remblai est très stable dans la zone d'étude et il reste stable ou à la limite de stabilité pour une intensité inattendu et il s'effondrera lorsque de l'accélération horizontale atteint la valeur 0.25g.

La figure IV.22 présente quelques courbes du facteur de sécurité en fonction du déplacement.

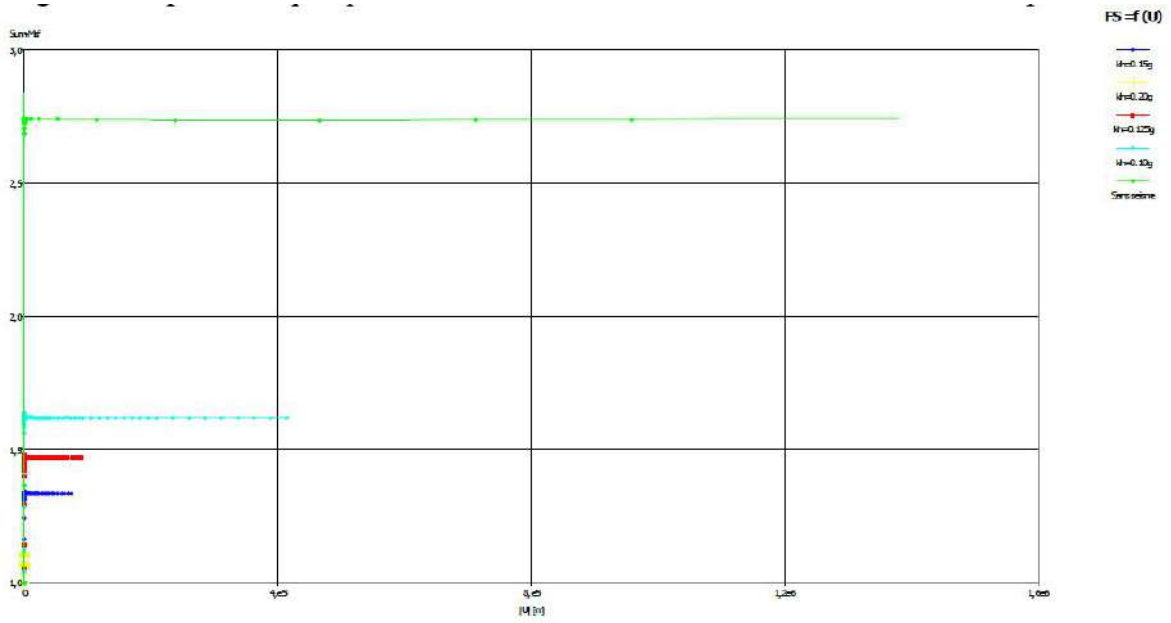


Figure IV.22 : Courbes du facteur de sécurité en fonction du déplacement

IV.4.5- Comparaison des résultats du FS par méthodes en EL et ceux de la méthode en EF :

Les résultats de calcul du facteur de sécurité, par la méthode numérique en élément fini implémentée dans le logiciel PLAXIS et ceux des méthodes classique en équilibre limite, implémentée dans le module SLOPE du logiciel Geostudio, sont encadrés dans le tableau IV.9:

Tableau IV.9: Valeurs du facteur de sécurité au glissement par EF et EL

	Equilibre limite			**Elément finis**
Type du chargement	**Fellenius**	**Bishop**	**Janbu**	**Plaxis**
G+Nappe	**2.88**	**3.16**	**2.82**	**2.74**
G+25 T+Nappe+ Séisme	**1.70**	**1.83**	**1.71**	**1.47**

IV.5. Synthèse :

Grace aux outils numériques utilisés, à savoir le module slope du logiciel GEOSTUDIO et le code en éléments finis Plaxis, on a pu vérifier la stabilité général du remblai et de calculer les déplacements verticaux, horizontaux et totaux en tout point du profil étudié en prenant en compte les différents cas de chargement possible et en incluant le phénomène consolidation dans les calculs.

Selon les calculs effectués par le logiciel GEOSLOPE, on constate que les méthodes de Fellenius et celle de Janbu donnent les mêmes valeurs du facteur de sécurité, tandis que la méthode de Bishop surestime les valeurs de 6à10%.

Les résultats des calculs par l'approche « phi-c reduction » utilisée par Plaxis sont proche aux valeurs de Fellenius et Janbu par rapport aux valeurs de Bishop.

Ces résultats confirment encore l'effet de l'accélération sismique sur les valeurs du facteur de sécurité vis-à-vis du glissement et sur les valeurs des déplacements.

Pour tous les cas de chargement le remblai reste très stable, le tassement maximal admissible, valeur qu'il faut prendre en compte lors de la réalisation du projet.

CONCLUSION GENERALE

Le développement des infrastructures de transports est la pierre angulaire de toute Politique d'aménagement d'un territoire. En effet, ce dernier qui est par définition, la meilleure répartition dans un cadre géographique des activités économiques en fonction des ressources naturelles et humaines, ne peut atteindre son objectif sans un développement harmonieux des infrastructures.

Ce travail a permis dans une première étape d'exposer l'étude géotechnique de la ligne ferroviaire Saida-El bayadh sur 26 KM, afin de dimensionner la structure d'assise, et aussi pour mieux maitriser les mouvements des terres, a cet effet, nous avons effectué d'une compagne de reconnaissance géotechnique commençant par les essais au laboratoire, essais in situ, en arrivant à la classification des sols suivant GTR, et l'UIC 719R et l'interprétation des résultats qui sert au dimensionnement de la structure d'assise de la voie ferrée du projet Saida-El Bayadh.

Dans une seconde étape, cette étude a permis de mettre en œuvre deux outils numériques performants dédiés à ce type d'études : le module SLOPE/w du logiciel GEOSTUDIO pour l'analyse de la stabilité des talus en ruptures circulaires et non circulaires par un calcul en équilibre limite avec la méthode des tranches (méthodes de Fellenius, de Bishop et Janbu) et le code de calcul en éléments finis PLAXIS pour l'analyse en déformations planes des massifs de sols ou des roches tendres par un calcul élasto-plastique avec un critère de type Mohr-Coulomb suivant un procédé de réduction des paramètres de cisaillement "phi-c reduction", Elle a permis d'analyser la stabilité du remblai de la ligne ferroviaire Saida-El Bayadh, en distinguant trois cas de configuration à savoir le calcul sous chargement gravitaire, le calcul sous effet chargement gravitaire en présence et le calcul par l'approche pseudo statique sous effet combiné du chargement gravitaire, chargement de l'essieu 25 T, la nappe et du séisme.

Ce projet de fin d'étude nous a permis d'enrichir nos connaissances dans le domaine géotechnique, et de cerner les problèmes géotechniques qui peuvent se présenter dans un projet de chemin fer pendant l'exécution.

REFERENCE

- [1] https://fr.wikipedia.org
- [2] www.sntf.dz Jean Alea (la voie ferré)
- [3] https://repositorio-aberto.up.pt les matériaux de voie ferrée sur ligne grande vitesse (LGV).
- [4] Conception du tracé de la voie courante V ≤ 220 km/h (version1 du 12/09/06 (SNCF).
- [5] Référentiel technique chapitre 7.2.2 Ouvrage en terre pour plates-formes ferroviaires.
- [6] Fiches U.I.C, 703R : caractéristiques de trace des voies parcourues par des trains de voyageurs rapides, 741O : quais des voyageurs -règle pour l'implantation des bordures des quais par rapport à la voie (4 *éme* éditions, décembre 2005), 719R : ouvrage en terre et couche d'assises ferroviaires
- [7] Cours d'exploitation des chemins de fer « la voie, tome3 » LAMALLE Ulysse).
- [8] Etude Avant Projet détaillé de la ligne ferroviaire Saida-El bayadh sur 200 KM élaboré via la Société d'Etudes Techniques et de l'Ingénierie du Rail (Setirail)
- [9] Code UIC, 719 R, a, b, c, d, e, f, i.
- [10] Méthodologie d'exécution des lignes ferroviaires V ≤ 220 km/h, Division des travaux ferroviaires DTF, Cosider Travaux Publics.
- [11] Site internet Actu Environnement.
- [12] Page 05 http://actgv.fr/wp-content/uploads/2014/01/Quest-ce-quun-rail-26-11-2013.pdf.
- [13] http://fr.suyurailway.com/ShowProducts.asp?id=42.
- [14] https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/632379
- [15] http://emdx.org/rail/CoeurMobile/index.html
- [16] http://www.aqui.fr/common/article-print.php?id_article=9110

Annexe01

Classifications selon GTR

