

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة سعيدة - د. مولاي الطاهر.
UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr.MOULAY TAHAR



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER en Génie civil

Spécialité : Géotechnique

**ANALYSE DE LA STABILITÉ DU CORPS DE CHAUSSEES EN
REMBLAIS, CAS AUTOROUTE EST OUEST (PK64+700-PK65+070)**

Présenté par :

**Rebia Hadj Amer
Slimani Mustapha**

Soutenu le .29/06 / 2025, devant le jury composé de:

Mr Taouil B	MCA	President
Mr Bilia Z	MCA	Examineur
M^{me} Ghafir M	MAA	Encadreur
M^r Hachemi H.	MCA	Co encadreur

Année universitaire 2024/2025

Remerciement

Nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a donné la force et le courage pour poursuivre nos études.

Nous remercions notre professeur Madame Ghefir Meriem d'avoir accepté de nous encadrer, sans ses orientations et ses suggestions les plus inestimables, surtout pour sa patience.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des professeurs du département de génie civil de l'Université saida, pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mes années d'études. Leur passion et leur dévouement pour la recherche m'ont inspiré et motivé à poursuivre mes propres questionnements scientifiques.

Sans oublier de remercier tous qui nous a aidés d'achever ce modeste travail soit de près ou de loin

REBIA et SLIMANI

Remerciement

Nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a donné la force et le courage pour poursuivre nos études.

Nous remercions notre professeur hachemi houari d'avoir accepté de nous encadrer, sans ses orientations et ses suggestions les plus inestimables, surtout pour sa patience.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des professeurs du département de génie civil de l'Université saida, pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mes années d'études. Leur passion et leur dévouement pour la recherche m'ont inspiré et motivé à poursuivre mes propres questionnements scientifiques.

Sans oublier de remercier tous qui nous ont aidés d'achever ce modeste travail soit de près ou de loin.

REBIA et SLIMANI

Dédicaces

Ce travail est dédié à toutes la famille Sans exception, en particulier à mon père, à mes frères, sœurs et à ma femme. Je pense aussi à mes enfants (Aïcha hiddayat. Mohamed siraj Eddine). Je tiens à remercier tous mes amis, en particulier Rebia Hadj Amer, mon binôme.

Et je remercier mes encadreurs madame Ghefir Meriem et monsieur Hachemi Houari. Je salue également tous mes professeurs et toute personne qui consulte ce travail modestement réalisé. Enfin, je veux remerciera aussi tous mes camarades de master 2 de génie civil, option géotechnique.

Slimani Mustapha

Dédicaces

Je tiens tout d'abord à exprimer, Ce travail est dédié à toutes la famille Sans exception, en particulier à mon père, et ma mère, pour leur soutien indéfectible et pour avoir toujours cru en moi. Leurs encouragements ont été mon refuge et ma motivation durant tout le parcours académique Je tiens à remercier tous mes amis, surtout mon amie Sabrina, en particulier Slimani Mustapha, mon binôme.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de mémoire, madame Ghefir Meriem et monsieur Hachemi Houari, pour son encadrement, sa patience et sa confiance tout au long de ce travail de recherche. Ses précieux conseils, son expertise et son soutien inébranlable ont été d'une aide inestimable et ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Que ce soit à travers des discussions enrichissantes, des conseils ou simplement par leur présence, leur contribution a été précieuse.

Rebia Hadj Amer

Résumé

La stabilité des structures de chaussées en remblai de grande hauteur est influencée par les différentes conditions des couches qui composent la structure routière, ainsi que par les charges dues au trafic routier, et même en cas de séismes. Tous ces éléments représentent un défi pour la stabilité de la chaussée et la sécurité des usagers de l'autoroute. Au cours de leur exploitation, les chaussées subissent diverses actions. Ces actions génèrent des contraintes au sein de la chaussée, dont les applications répétées provoquent des désordres visibles à la surface, communément appelés dégradations. Avec le temps, ces dégradations peuvent évoluer d'un stade léger à un stade sévère, nécessitant, une fois ce dernier atteint, une intervention de réfection ou de correction dans les meilleurs délais. L'objectif de notre étude est de répondre aux questions suivantes :

Quelles sont les causes les plus probables de ces dégradations ?

Quels moyens peuvent être mis en œuvre pour prévenir ces dégradations ?

Comment proposer des solutions fiables en cas d'intervention ?

Ce travail se concentre sur l'analyse de ces questions à travers des cas réels, notamment sur l'autoroute est-ouest. (PK 64+700-PK65+070). Notre recherche traite d'un sujet intéressant, à savoir l'analyse de la stabilité des structures de chaussées en remblais, en prenant pour exemple l'autoroute Est-Ouest dans la région de Tlemcen (PK64+700-).

Mots clés : la chaussée, trafic routier, dégradations, la stabilité, la sécurité des usagers.

Abstact

The stability of high-rise embankment pavement structures is influenced by the different conditions of the layers that make up the road structure, as well as by loads due to road traffic, and even in the event of earthquakes. All these elements represent a challenge for the stability of the pavement and the safety of highway users. During their operation, pavements undergo various actions. These actions generate stresses within the pavement, the repeated applications of which cause visible disorders on the surface, commonly called degradations. Over time, these degradations can evolve from a mild stage to a severe stage, requiring, once the latter is reached, a repair or correction intervention as soon as possible. The objective of our study is to answer the following questions:

What are the most likely causes of these degradations?

What means can be implemented to prevent these degradations?

How can reliable solutions be proposed in the event of intervention?

This work focuses on the analysis of these questions through real cases, particularly on the east-west highway. (PK 64+700-PK65+070). Our research deals with an interesting topic, namely the analysis of the stability of embankment road structures, taking as an example the East-West highway in the Tlemcen region (PK64+700-).

Keywords : road surface, road traffic, damage, stability, user safety.

ملخص

يتأثر استقرار هياكل رصف السدود الشاهقة بالظروف المختلفة للطبقات التي يتكون منها هيكل الطريق، وكذلك بالأحمال الناتجة عن حركة المرور على الطرق، وحتى في حالة الزلازل. وتمثل كل هذه العناصر تحدياً لاستقرار الرصيف وسلامة مستخدمي الطريق. أثناء تشغيلها، تخضع الأرصفة لعمليات مختلفة. تؤدي هذه الإجراءات إلى توليد ضغوط داخل الرصيف، ويؤدي تكرارها إلى حدوث اضطرابات مرئية على السطح، والتي تسمى عادة بالتدهور. مع مرور الوقت، يمكن أن تتطور هذه التدهورات من مرحلة خفيفة إلى مرحلة شديدة، وتتطلب، بمجرد الوصول إلى المرحلة الأخيرة، تدخلاً للإصلاح أو التصحيح في أقرب وقت ممكن. الهدف من دراستنا هو الإجابة على الأسئلة التالية:

ما هي الأسباب الأكثر احتمالاً لهذه التدهورات؟

ما هي الوسائل التي يمكن تنفيذها لمنع هذه التدهورات؟

كيف يمكن اقتراح حلول موثوقة في حالة التدخل؟

يركز هذا العمل على تحليل هذه الأسئلة من خلال حالات واقعية، وخاصة على الطريق السريع بين الشرق والغرب. (PK 64+700-PK65+070). يتناول بحثنا موضوعاً مثيراً للاهتمام، ألا وهو تحليل استقرار هياكل الطرق الترابية، مع الأخذ كمثال الطريق السريع شرق-غرب في منطقة تلمسان. (PK64+700-)

الكلمات المفتاحية: سطح الطريق، حركة المرور على الطرق، الضرر، الاستقرار، سلامة المستخدم

Sommaire

Remerciements	
Remerciements	
Dédicace	
Résumé	I
Abstract	II
الملخص	II
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VII
Liste des indices	IX
Introduction générale	1

CHAPITRE I. GENERALITEES SUR LES ROUTES

I.1. Introduction	3
I.2. Définition de la route	3
I.3. Les différents types des routes	3
I.4. La classification fonctionnelle	5
I.5. Configuration du réseau routier	8
I.6. Les éléments géométriques de la route	8
I.6.1. Le tracé en plan	8
I.6.1.1. Règles à respecter dans le tracé en plan	9
I.6.1.2. Élément du tracé en plan	9
I.6.2. Le profil en long	10
I.6.2.1. Règle à respecter dans le tracé du profil en long	10
I.6.2.2. Les éléments de composition du profil en long	11
I.6.3. Le profil en travers	11
I.6.3.1. Le profil en travers	11
I.7. Classification du profil en travers	18
I.7.1. Profil en travers type	19
I.7.2. Profil en travers courant	19
I.7.2. Profil en travers courant	19
I.9. Dimensionnement de la chaussée	20
I.10. Constitution d'une chaussée : les différentes couches	20
I.10.1. Sol support	21
I.10.2. Couche de forme	21
I.10.3. Couches d'assise	21
I.10.4. La couche de surface	22
I.11. Les différents types de chaussée	22
I.11.1. Les chaussées souples	22
I.11.2. Les chaussées bitumineuses épaisses	23
I.11.3. Les chaussées mixtes	23
I.11.4. Les chaussées semi-rigides	23
I.11.5. Les chaussées à structure inverse	24
I.11.6. Les chaussées rigides (en béton de ciment)	24
I.12. La démarche de dimensionnement	25
I.13. Conclusion	25

CHAPITRE II. DEGRADATION DES CHAUSSEES

II.1.Introduction	26
II.2.Les principales causes de degradation	26
II.2.1. Les chaussées revêtues	26
II.2.1.1 La qualité des matériaux	26
II.2.1.2. La mise en œuvre	26
II.2.1.3. Le trafic	27
II.2.1.4. Les conditions climatiques et effets chimique	27
II.2.2. Les chaussées non revêtues	28
II.3.Les types de degradation	28
II.3.1. Les dégradations structurelles (Type A)	28
II.3.2. Les dégradations non structurelles (Type B)	28
II.4.Processus de dégradation par type de chaussées	29
II.4.1.Chaussées revêtues	29
II.4.1.1. Chaussées souples	29
II.4.1.2. Chaussées semi-rigides	30
II.4.1.3. Chaussées rigidez	31
II.4.2. Les chaussées non revêtues	31
II.4.2.1. Action des véhicules	31
II.4.2.2. Action de l'eau	32
II.5.Dégradation sur les chaussées revetues	33
II.5.1. Dégradations sur les chaussées à revêtement bitumineux	33
II.5.1.1. Les déformations	33
II.5.1.2. Les fissurations	36
II.5.1.3. Les arrachements	39
II.5.1.4. Les mouvements de matériaux	44
II.5.2. Dégradations sur les chaussées en béton	46
II.5.2.1. Les fissurations	46
II.5.2.2. Les épaufrures	47
II.5.2.3. Les décalages de joint (de dalles ou de fissure)	48
II.5.2.4. Le pompage	49
II.6.Dégradation sur les chaussées non revetues	49
II.6.1. Les déformations Les ornières	49
II.6.2. Les arrachements	51
II.7.conclusion	53

CHAPITER III:LES MODÈLES DE COMPORTEMENT ET L'OUTIL NUMÉRIQUE UTILISÉ

III.1. Aperçu de la méthode des éléments finis	54
III.1.1 Introduction	54
III.1.4. Calculs par la MEF	54
III.1.5. Présentation de Plaxis	55
III.1.6. Le code éléments finis Plaxis	55
III.1.7. Options par défaut et solutions approchées	55
III.2. Les modèles de comportement utilisés dans Plaxis	57
III.2.1. Contraintes totales, effectives et pressions interstitielles	57
III.2.2. Modèle élastiqu	58
III.2.3. Modèle de Mohr-Coulomb	59
II.3.conclusion	63

CHAPITER IV: MODELISATION NUMERIQUE PAR LE CODE PLAXIS

IV.1. Introduction	65
IV.2. Lieu de l'étude	65
IV.3. Topographie et géomorphologies	65
IV.4. Données géotechnique des différentes couches	66
IV.5. Les charges réparties	66
IV.5.1. Charge des vehicules	66
IV.5.2. Structures de chaussee de l'autoroute	66
IV.6. Modélisation du projet	67
IV 6.1. Entrer des données	67
IV.6.1.1. Paramètres généraux	67
IV.6.1.2. Modèle géométrique	67
IV.6.1.3. Matériaux et génération de maillage	68
IV.6.1.4. Maillage	69
IV.6.1.5. Détermination du chargement	69
IV.6.2. Calculs	70
IV.6.2.1. Conditions initiales	70
IV.6.2.3. Phases de calcul	71
IV.6.2.4. Connectivités	71
IV.7 Résultats et Discussion	73
IV.7.1 Excess prossures	73
IV.7.2 Deformed mesh	75
IV.7.3 Total displacements(U_{tot})	75
IV.7.4 Vertical displacements(U_y)	76
IV.7.5 Horizontal displacements(U_X)	76
IV.8 Réduction des caracteristiques mecaniques(ϕ -creduction)	77
IV.9.conclusion	82
CONCLUSION GÉNÉRALE	83

LISTE DES FIGURES

- Figure I. 1 :** Routes à une voie de circulation
Figure I. 2 : Routes à deux sens de circulation
Figure I. 3 : Route à multi-voies de circulation
Figure I. 4 : CONSISTANCE DU PATRIMOINE ROUTIER
Figure I. 5 : Chemin communale
Figure I. 6 : Chemin Wilaya
Figure I. 7 : Route Nationale
Figure I. 8 : Autoroute
Figure I. 9 : Réseau routier national
Figure I. 10 : Tracé en plan d'une route
Figure I. 11 : Les éléments du profil e travers
Figure I. 12 : La chaussée
Figure I. 13 : L'accotement
Figure I. 14 : Terreplein central
Figure I. 15 : Le fosse
Figure I. 16 : Le fossé trapézoïdal
Figure I. 17 : Talus en Rembla
Figure I. 18 : Talus en déblai rocheux / ponté presque verticale
Figure I. 19 : Talus en déblai roche massive / ponté stable
Figure I. 20 : La bande d'arrêt d'urgence (BAU)
Figure I. 21: Buse simple
Figure I. 22: Dalot simple
Figure I. 23: Buse double
Figure I. 24: Dalot double
Figure I. 25: Buse triples
Figure I. 26 : Dalot triples
Figure I. 27 : Coupe d'une structure de chaussée non revêtue
Figure I. 28 : Chaussée souple
Figure I. 29 : Les chaussées semi-rigides
Figure I. 30 : Chaussée rigide
Figure II. 1 : les affaissements
Figure II. 2 : l'orniérage
Figure II. 3 : les bourrelets
Figure II. 4 : les fissures transversales
Figure II. 5 : les fissures longitudinales
Figure II. 6 : le faïençage
Figure II. 7 : plumage
Figure II. 8 : peignage
Figure II. 9 : les arrachements
Figure II. 10 : la pelade
Figure II. 11 : les nids de poule
Figure II. 12 : exemple de réparation
Figure II. 13 : réparation dégradée
Figure II. 14 : le ressuage
Figure II. 15 : les remontées de fines
Figure II. 16 : réseau de fissure de forme diverses
Figure II. 17 : fissure en coin de dalle
Figure II. 18 : les épaufrures
Figure II. 19 : exemple de décalage
Figure II. 20 : Pompage caractérisé par l'humidification de la chaussée aux bords des joints
Figure II. 21 : les ornières
Figure II. 22 : la tôle ondulée
Figure II. 23 : bourbier

Figure II. 24 : le ravinement
Figure II. 25 : les nids de poule
Figure III 1 : Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire
Figure III.2 : Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique
Figure III.3 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb
Figure III.4 : Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour $c=0$
Figure III . 5 : Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb
Figure III . 6 : Définition du module à 50 % de la rupture
Figure III 7 : Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb
Figure IV 1 : Coupe transversale du tronçon Autoroute
Figure IV 2 : Générale setting
Figure IV 3 : Géométrie avec les différentes couches de sols
Figure IV 4 : Détermination et affectation des données des différentes couches
Figure IV 5 : Choix de la densité du maillage
Figure IV 6 : Modèle avec maillage de densité moyen
Figure IV 7 : Affectation des charges réparties
Figure IV 8 : Affectation poids volumique pour l'eau
Figure IV 9 : Conditions initiales
Figure IV 10 : Les Pressions interstitielles
Figure IV 11 : Contraintes initiales
Figure IV 12 : Phases et type de calcul
Figure IV 13 : Points de mesure
Figure IV 14 : Excess pore pressures
Figure IV.15. Définition de niveau de la nappe phréatique
Figure. IV.16. Développement de la surpression interstitielle sous le remblai
Figure IV.17 : Déformation du maillage
Figure IV.18 : Les zones de déplacement total
Figure IV.19: Les zones de déplacement total
Figure IV.20. : déplacement verticale
Figure. IV.21 : déplacement horizontal
Figure IV.22: Évaluation du facteur de sécurité pour le processus de construction (point A).
Figure. IV.23 : résultats inclinométrique
Figure IV.24 : Évaluation du facteur de sécurité pour le processus de construction (point B)
Figure IV.25 : résultats inclinométrique.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I 1: Evolution de la consistance du réseau routier 2005-2009

Tableau IV.1 : caractéristique géotechnique des sols

Tableau IV..2: Evaluation du chargement réparties

LISTE DES INDICES

CC : Chemin communale

CW : Chemin Wilaya

RN : Route Nationale

A : Autoroute

P : Poids propre

Fc : La Force Centrifuge

R : La composante de la résultante P+Fc

BAU : Les Bandes d'Arrêt d'Urgence

PST : Plate-Forme Support de Chaussée

BB : Béton Bitumineux

GNT : Grave Non Traité

MTLH : Matériaux Traités au Liant Hydraulique

γ_{sat} Poids volumique saturé [kN/m³]

ϵ_v Deformation volumique [-]

ν Coefficient de Poisson [-]

ν_u Coefficient de Poisson ultime [-]

σ Contrainte [kN/m²]

τ Contraintes de cisaillement [kN/m²]

ϕ Angle de frottement interne du sol [°]

ψ Angle de dilatance du sol [°]

c Cohésion du sol [kN/m²]

d Epaisseur équivalente [m]

E Module d'Young [kN/m²]

EA Rigidité normale [kN/m]

EI Rigidité de flexion [kNm²/m]

G	Module de cisaillement [kN/m ²]
K_0	Coefficient des terres au repos [-]
K_x	Perméabilité horizontale [m/jour]
K_y	Perméabilité verticale [m/jour]
Y_{ref}	Unité de profondeur [m]
n	Porosité [-]
C'	Cohésion drainée à long terme KN/m ²
C_u	Cohésion non drainée à court terme KN/m ²
C_i	Cohésion apparente de la tranche i KN/m ²
E_{oed}	Module d'Young tangent dans un essai oedométrique
E_{50}^{ref}	Module d'Young sécant dans un essai triaxial
E_{50}	Module d'Young sécant à 50% de la résistance en compression
E_0	Module d'Young tangent

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERAL

Le secteur des transports est un élément clé pour l'équipement et le développement d'un pays. Il représente un pilier fondamental dans toute stratégie de croissance économique. En tant que secteur stratégique, le transport joue un rôle vital pour répondre aux besoins de la population et pour renforcer les autres secteurs économiques. Il agit comme un moteur de développement, comme le prouvent de nombreux pays, qu'ils soient industrialisés ou en voie de développement, y compris l'Algérie.

L'autoroute Est-Ouest (A1), épine dorsale du réseau routier algérien, s'étend sur 1 216 kilomètres, reliant la frontière tunisienne à la frontière marocaine. Qualifié de « projet du siècle », sa mission est de moderniser les infrastructures et de dynamiser l'économie nationale, un objectif stratégique porté par les instances étatiques. Réalisée par les consortiums COJAAL (japonais) et CITIC-CRCC (chinois), sa construction fut un défi technique majeur, non sans controverses. Au-delà de son impact structurant, l'autoroute est aussi perçue comme un symbole de puissance et une vitrine politique du pouvoir en place. En réduisant drastiquement les temps de parcours, elle a fluidifié les échanges entre les grandes métropoles du nord, devenant un outil essentiel pour le désenclavement et le développement régional.

Bien que présentée comme une réalisation d'envergure, l'autoroute Est-Ouest en Algérie est devenue un cas d'école en matière de dégradations structurelles prématurées. Peu de temps après son inauguration, de nombreux tronçons ont révélé des pathologies sévères, compromettant à la fois la sécurité des usagers et la pérennité de l'ouvrage. Celles-ci se manifestent par des affaissements de chaussée, des fissurations longitudinales et transversales, et surtout par des glissements de terrain spectaculaires, dont le plus emblématique reste celui de Djebahia, dans la wilaya de Bouira.

Les expertises techniques ont mis en lumière un faisceau de causes interdépendantes. En premier lieu, des études géotechniques lacunaires ou hâtivement menées ont conduit à une mauvaise appréciation de la nature instable de certains sols, notamment les marnes et les argiles gonflantes qui caractérisent plusieurs zones du tracé. S'ajoute à cela une critique récurrente sur la qualité des matériaux utilisés et des malfaçons durant la phase de construction, souvent attribuées à un manque de contrôle et de suivi rigoureux de la part des maîtres d'ouvrage. Ces défaillances techniques ont été exacerbées par une gouvernance de projet défailante, marquée par la précipitation et des scandales de corruption, comme l'a relevé la Cour des Comptes dans ses rapports, pointant des surcoûts exorbitants liés aux incessants travaux de réparation. En conséquence, l'autoroute, initialement conçue comme un vecteur de développement, est devenue un symbole des défis de la gestion des grands projets d'infrastructure, générant des coûts de maintenance colossaux qui grèvent lourdement le budget de l'État.

Ce mémoire se concentre sur l'analyse structurelle de la chaussée du tronçon routier de l'autoroute Est-Ouest, de Tlemcen vers Sidi Belabes, désigné la section W7 (PK 64+700) de la partie autoroute Tlemcen, et le PK 65+070 suivant le tracé de l'autoroute de l'est à l'ouest. Ce Le mémoire se divise en quatre chapitres.

La démarche commence par une analyse théorique, illustrée par des exemples pratiques. La partie théorique comprend quatre chapitres, organisés comme suit :

Le premier chapitre aborde les différents types de chaussées et leurs caractéristiques.

Le deuxième chapitre explique les principales causes des dégradations des chaussées.

Chapitre trois nous avons préparés la modélisation du comportement du corps de chaussée de l'autoroute Est Ouest avec le logiciel du code éléments finis « Plaxis ».

On a fini notre travail par le dernier chapitre qu'il s'agit de l'analyse de stabilité de corps chaussée sur une étude de cas et la modélisation. Il expose les paramètres géotechniques, les coefficients de sécurité à deux glissements observés sur une voie autoroutière dans la région de Tlemcen La modélisation, basée sur la méthode des éléments finis, a été réalisée avec le logiciel Plaxis 2D.

CHAPITRE 01 : GÉNÉRALITÉ SUR LES CHAUSSÉES

Chapitre 1 : Généralités sur les Chaussées

I.1. INTRODUCTION

Les chaussées apparaissent comme des structures à plusieurs couches, qui sont mises en place. Pour distribuer les charges générées par le trafic que le sol seul ne pourrait supporter. Les routes en Algérie contribuent énormément à la mobilité des habitants et le soutien de leur infrastructure économique. Il ne faut donc pas négliger l'importance de concevoir et, plus particulièrement, de préserver économiquement ces précieux a tous routiers réseau. Actuellement, ils se trouvent dans une situation inquiétante.

I.2. DEFINITION DE LA ROUTE

Dans son sens le plus strict, une route est une voie terrestre (sur le sol ou sur un viaduc) conçue pour faciliter le passage des véhicules à roues. Ce terme concerne plutôt les routes majeures situées en zone rurale et ne doit pas être confondu avec une rue. À la fin du XXe siècle, dans les nations étendues et peu densément peuplées, un grand nombre de routes demeuraient encore des voies pavées ou damées, communément appelées les « sentiers battus ».

À l'heure actuelle, les voies de circulation sont fréquemment empruntées par des véhicules motorisés à des vitesses supérieures à celles observées dans les rues urbaines. Cette vitesse permet de diminuer les temps de trajet, mais entraîne une énergie largement supérieure qui, lors de l'impact, cause des collisions plus violentes et donc des répercussions plus sévères.

I.3. LES DIFFERENTS TYPES DES ROUTES

La catégorisation des routes en fonction de leur signification est précisée par la norme algérienne « B40 ». Deux paramètres principaux déterminent le choix du type de voirie : la nature de la liaison « entre deux points - pôles - administratifs, industriels, politiques, etc. », et les aspects du trafic « le volume définit la géométrie, sa composition détermine l'épaisseur de la chaussée ».

Routes à une voie de circulation



Figure I-1 : Routes à une voie de circulation. [1]

Routes à deux sens de circulation

FigureI-2 : Routes à deux sens de circulation. [2]

Route à multi-voies de circulation

FigureI-3 : Route à multi-voies de circulation. [3]

I.4. LA CLASSIFICATION FONCTIONNELLE

La classification fonctionnelle consiste à établir une hiérarchie des routes en fonction de leurs rôles respectifs, basée sur des paramètres démographiques et socio-économiques.

En Algérie on classe les routes comme suite :



FigureI-4 : Consistance du patrimoine routier

De 1962 à 1999, le réseau routier a connu une expansion linéaire de plus de 37 000 km, ce qui représente une augmentation de plus de 55% sur une période de 37 ans par rapport à l'année 1962. L'extension de ce réseau a continué au-delà de l'année 1999.

.Tableau I 1: Évolution de la consistance du réseau routier 2005-2009

Année	RN	CW	CC	TOTAL
2005	28156	23806	56340	108302
2006	28275	23926	57251	109452
2007	28655	23879	57591	110125
2008	29146	23634	58481	111261
2009	29 280	23 771	59 645	112.696

Chemin communale « CC » :

Décrite par un jalon kilométrique blanc qui fait le lien entre les villes de la commune.



Figure I-5 : Chemin communale. [4]

***Chemin Wilaya « CW » :**

Identifiée par un jalon blanc et jaune reliant des municipalités inter communales.



Figure I-6 : Chemin Wilaya. [5]

Route Nationale « RN »

Définie par un jalon kilométrique blanc et rouge reliant diverses municipalités inter-wilayas ou traversant plusieurs wilayas.



Figure I-7 : Route Nationale. [6]

Autoroute « A » :

La gestion des routes hors catégorie « classification spéciale » est assurée de manière autonome par l'« Agence Nationale de la Gestion des Autoroutes ».



Figure I-8 : Autoroute. [7]

I.5. CONFIGURATION DU RÉSEAU ROUTIER

Le réseau routier en Algérie reste parmi les plus fournis d'Afrique, avec une étendue de 124 107 km. Son intensité est marquée dans la zone nord du pays, relativement diffus sur les hauts plateaux et se limite à quelques routes dans le sud.

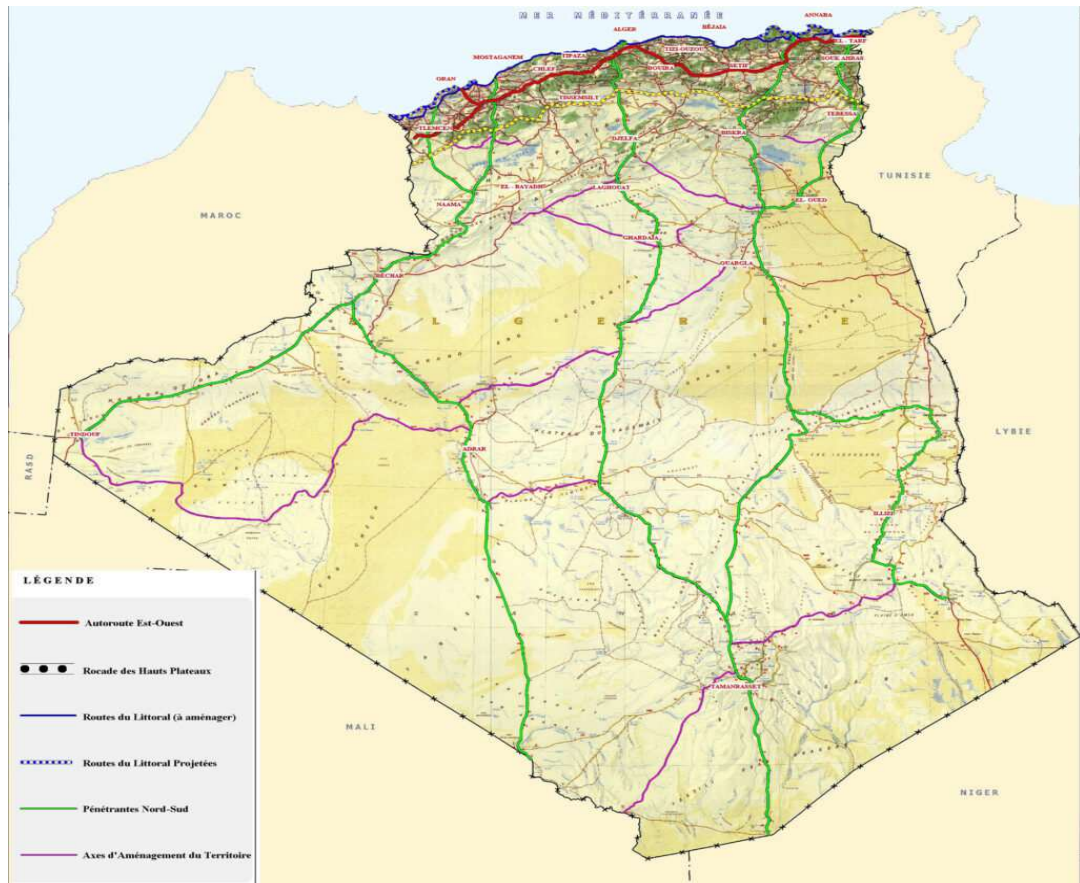


Figure I-9 : Réseau routier national

I.6. LES ÉLÉMENTS GÉOMÉTRIQUES DE LA ROUTE

I.6.1. Le tracé en plan

Le plan est constitué d'une série de lignes connectées par des liaisons. Il illustre la représentation de l'itinéraire routier sur un plan horizontal, qui peut être une carte topographique ou un relief dépeint par des courbes de niveau.

Les propriétés des éléments qui composent le tracé routier doivent garantir le confort et la stabilité. Ces caractéristiques sont fournies directement dans les codes de la route, en tenant compte de la vitesse de base et du coefficient de frottement de la couche de roulement.

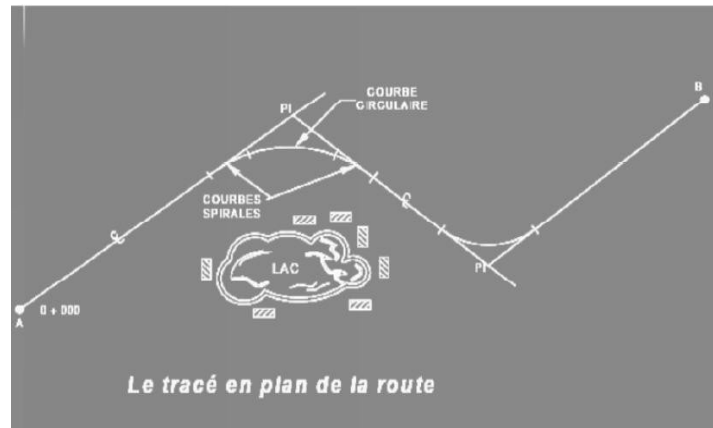


Figure I.10. Tracé en plan d'une route.[8]

I.6.1.1. Règles à respecter dans le tracé en plan

L'ajustement du tracé en plan au relief naturel pour éviter les grands travaux de terrassement ;

S'abstenir de traverser, si cela est faisable, les terrains agricoles et les zones boisées ;

Se lier au réseau routier existant ;

Évitez de traverser les oueds pour réduire le nombre d'ouvrages d'art, et ce pour des raisons économiques.

Si la traversée est indispensable, tentez de contourner les ouvrages inclinés.

Substituer deux cercles adjacents de même orientation et de rayons distincts par un seul cercle.

Évitez les lieux qui sont sujets à des problèmes géologiques (présence de failles ou de matériaux présentant des qualités très médiocres) ;

On doit toujours utiliser les rayons supérieurs au rayon minimal normal ;

Il faut éviter les alignements droits très longs.[8]

I.6.1.2. Éléments du tracé en plan

Alignement :

On a longtemps favorisé le parcours linéaire en raison de sa brièveté, mais aujourd'hui , Il est déconseillé d'effectuer de longs alignements, car :

Éblouissement dû aux phares (conduite nocturne) ;

Mauvaise intégration de la route dans le paysage ;

Esthétique compliquée ;

Favorise la vitesse excessive .

Pour ce faire, on doit effectuer une trajectoire légèrement déviée. Il est nécessaire de substituer ces longues lignes droites par une série de courtes sections et de courbes. En réalité, le pourcentage idéal d'alignement droit sur une section de route se situe généralement entre 20% et 60%. [8]

Arc de cercle:

Une courbe relie deux tracés droits de directions différentes. Nous avons pour mission de garantir une transition aisée et sécurisée pour un utilisateur lors du passage d'un alignement droit à un autre. Il est donc nécessaire de sélectionner un rayon de la courbe qui garantit cette condition. Ainsi, trois facteurs contribuent à restreindre la courbure :

La stabilité des véhicules sous l'influence de l'accélération centrifuge ;

La visibilité dans les courbes.

Rayon en plan:

Un véhicule en mouvement dans un tournant est affecté par diverses forces, dont son propre poids P et la force centrifuge F_c . Si la composante de la force résultante R' sort du polygone de forces, le véhicule devient instable et se renverse. [9]

I.6.2. Le profil en long

Le profil en long représente une section du terrain le long d'un plan vertical qui suit l'axe de la route. Il est constitué de portions de droite avec inclinaison en rampe et en pente, ainsi que de liaisons circulaires ou paraboliques. On peut connecter ces pentes et rampes soit par des angles proéminents, soit par des angles rentrants. Le type de courbe de raccordement le plus fréquemment employé est le parabolique, qui simplifie la mise en place des points du projet.

I.6.2.1. Règle à respecter dans le tracé du profil en long

La conception du profil longitudinal se basera sur les règles suivantes :

Suivre les valeurs des paramètres géométriques recommandées par les réglementations actuelles ;

Évitez les angles rentrants en déblai, car il faut prévenir l'accumulation d'eau et garantir son drainage;

Il est préférable d'avoir un profil en long avec un léger remblai plutôt qu'un profil en long avec un léger déblai, qui rend l'évacuation des eaux plus complexe et isole la route du paysage.;

Pour garantir un drainage efficace de l'eau, on placera les zones des dévers nul dans une pente du profil en long ;

Cherche à établir un équilibre entre le volume des matériaux excavés et celui des matériaux remblayés ;

Évitez une hauteur trop importante en remblai ;

Veiller à une harmonisation efficace entre le dessin en plan et le profil longitudinal, l'intégration ;

Pour éviter les tracés interrompus composés de multiples segments de pentes adjacentes, il est préférable d'opter pour une solution unique sous forme de cercle, ou un agencement de cercles et d'arcs aux

courbures progressives de très large rayon ;Substituer deux cercles adjacents de même orientation par un seul cercle; Ajuste le profil allongé aux grandes lignes du panorama.[8]

I.6.2.2. Les éléments de composition du profil en long

Le profil en long est formé d'une série de tronçons linéaires (pentes et rampes). Reliés par des arcs de cercle, il faut définir pour chaque point du profil longitudinal :

- L'altitude du terrain naturel ;
- L'altitude du projet ;
- La pente du projet.

I.6.3. Le profil en travers

On définit le profil en travers comme étant la section effectuée selon un plan vertical qui est perpendiculaire à l'axe du projet. L'établissement du profil en travers consiste à définir l'ampleur de la chaussée et de ses éléments adjacents. On identifie trois catégories de profils en travers:

- Profil en travers sur déblai
- Profil transversal en remblai ;
- Profil en coupe mixte (remblai et déblai).

I.6.3.1. Les éléments du profil en travers

Il représente principalement la largeur de la route et celle des bas-côtés.

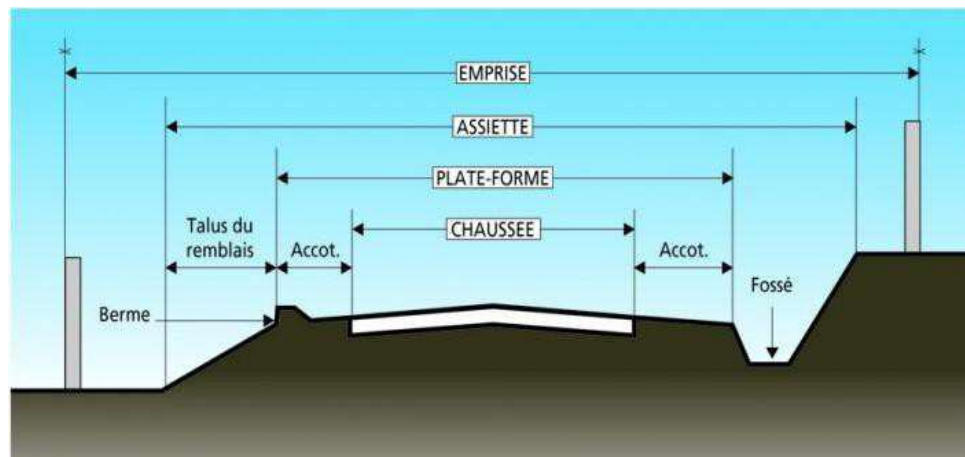


Figure I.11 : Les éléments du profil en travers. [10].

La chaussée :

C'est la partie consolidée conçue pour le passage des véhicules. Pour accommoder directement les mouvements des véhicules et les impacts environnementaux, sa largeur est essentiellement définie par des critères de circulation, elle est segmentée en bandes de circulation.



FigureI-12 : La chaussée

La largeur de la chaussée varie entre 3 à 7

Les accotements:

Les accotements, situés sur les côtés de la route, étaient autrefois destinés au stockage de matériaux ou à la

circulation des piétons. Aujourd'hui, leur usage principal est le stationnement.

Sur les voies principales, les accotements ont une largeur de 2.5m et servent de bande d'arrêt. Il fonctionne comme un soutien latéral pour la structure de la route, ainsi que comme un abri pour les véhicules immobilisés ou défectueux. Ce dispositif autorise le passage des véhicules d'urgence et offre une protection à l'automobiliste face à un dépassement inattendu, en lui fournissant la possibilité d'éviter une collision de face.

Les accotements étendus procurent aux automobilistes un sentiment de confort et de sûreté.



FigureI-13 : L'accotement

Terre plein central :

Dans le domaine de la conception routière, un séparateur fait référence à une zone ou un mécanisme situé entre deux voies roulables utilisées par des circulations dans le même sens ou en sens opposé, et conçu pour dissuader ou empêcher la traversée des véhicules d'une chaussée à l'autre. C'est une réserve de terrain en vue d'une éventuelle extension ou déviation de la route ou de l'autoroute concernée.



FigureI-14 : Terreplein central

Le fossé :

Ce sont les fouilles effectuées de chaque côté de la plateforme. Leur but est de purifier la plateforme en rassemblant les eaux de ruissellement. On fait la distinction. Ce sont les fouilles effectuées de chaque côté de la plateforme. Leur but est de purifier la plateforme en rassemblant les eaux de ruissellement. On fait là Destination.



FigureI-15 : Le fossé

Le fossé trapézoïdal :

Les fossés trapézoïdaux collectent les eaux de pluie et de ruissellement, les canalisant vers un point de décharge ou un cours d'eau.



Figure I-16 : Le fossé trapézoïdal

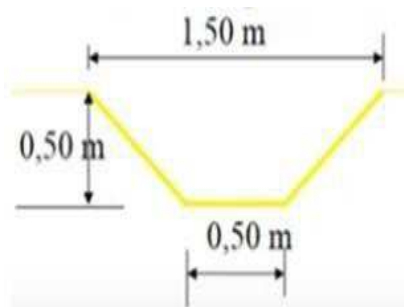


Schéma I-1 : Le fossé trapézoïdal

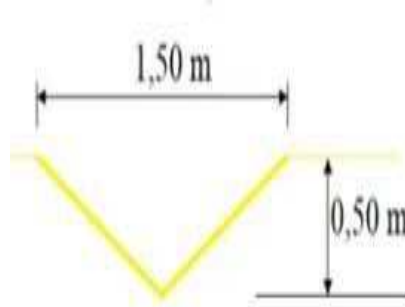


Schéma I-2 : Le fossé triangulaire

La plate-forme :

La route est constituée de la surface qui inclut la ou les chaussées, les accotements et, le cas échéant, les terres remplies.

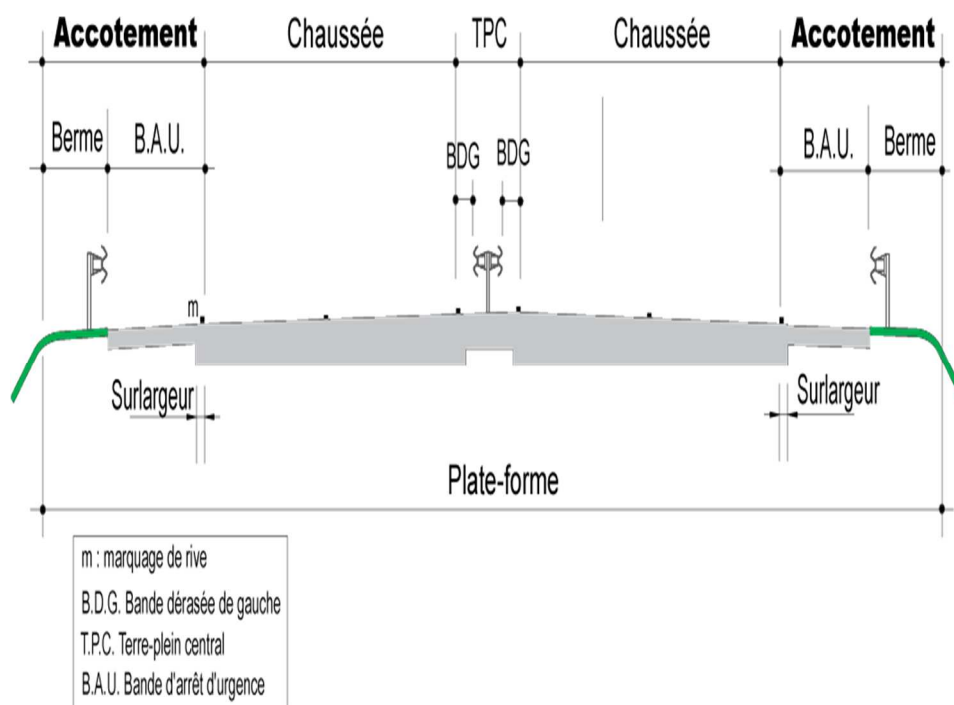


Schéma I-4 : La plate-forme

L'assiette :

C'est la surface du terrain réellement occupée par la route et ses annexes.

(Plate-forme + faussée + talus + toute dépendance et ouvrages affectés au DP).

L'emprise:

C'est la surface de terrain juridiquement affectée à la route et ses annexes. Elle au moins égale à l'assiette

Elle est généralement de :

30 m pour les routes ;

70 à 100 m pour les autoroutes.

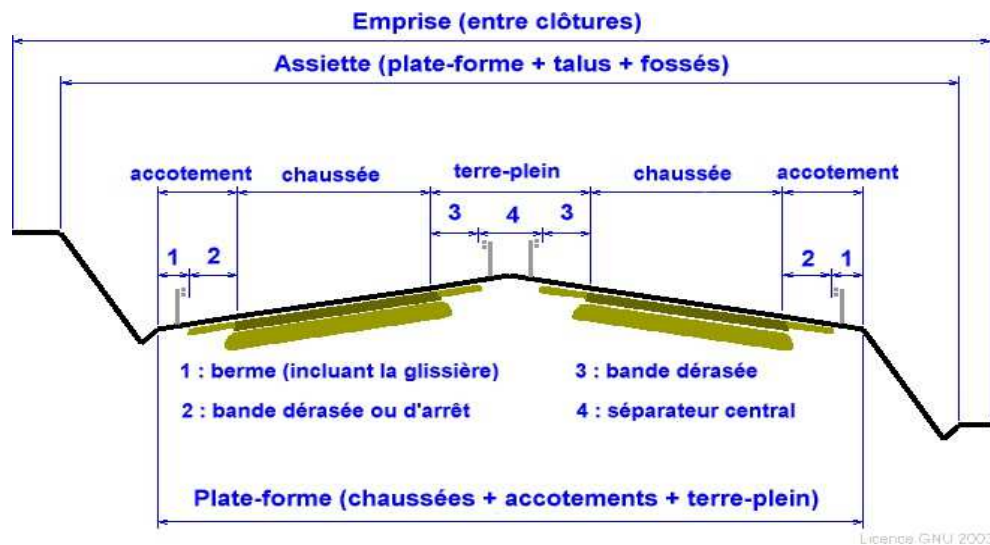


Schéma I-5 : L'emprise

Le talus:

Section de la route située entre le bas-côté et le fossé. On différencie les talus formés par remblais et ceux issus de déblais.

On règle habituellement les talus de remblais à une inclinaison de 3/2 ;

On règle habituellement les talus de déblais à une inclinaison de 1/1.

Remblais – Déblais:

On dit qu'une route est en remblais lorsqu'elle est construite au-dessus du sol naturel.

On dit qu'elle est en déblais lorsqu'elle est construite sous le niveau du sol naturel.



Figure I-17 : Talus en Remblai



Figure I-18 : Talus en déblai rocheux / ponté presque verticale

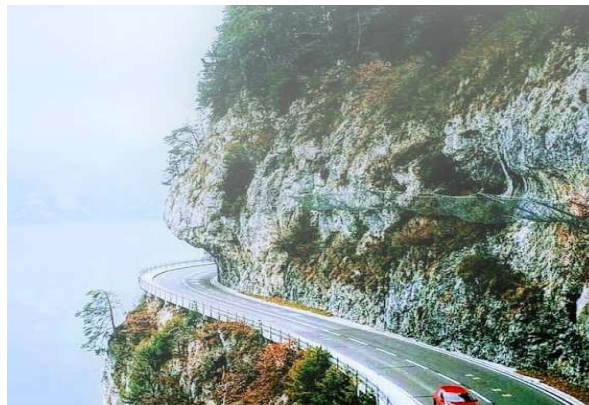


Figure I-19 : Talus en déblai roche massive / ponté stable

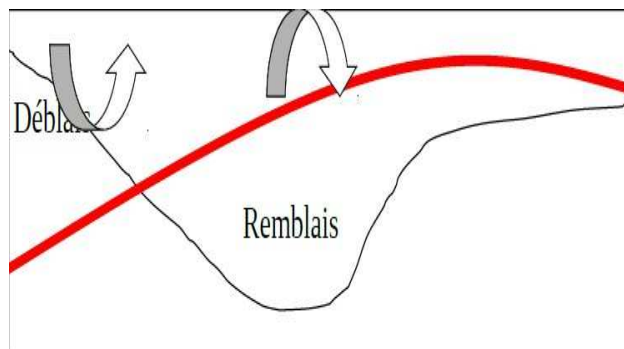


Schéma I-5 : Remblai et déblai

Dévers :

Il s'agit de la pente latérale de la route.

En positionnement à gauche Le dévers a pour but de drainer les eaux de surface ;

Les pentes en courbe permettent non seulement de décharger les eaux de ruissellement, mais également de contrebalancer partiellement la force centrifuge.

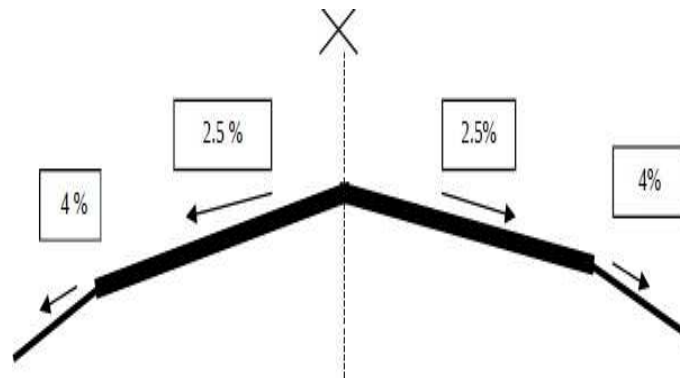


Schéma I-6 : Dévers

La berme :

La berme d'une route désigne la section de l'accotement qui n'est pas destinée à la circulation.

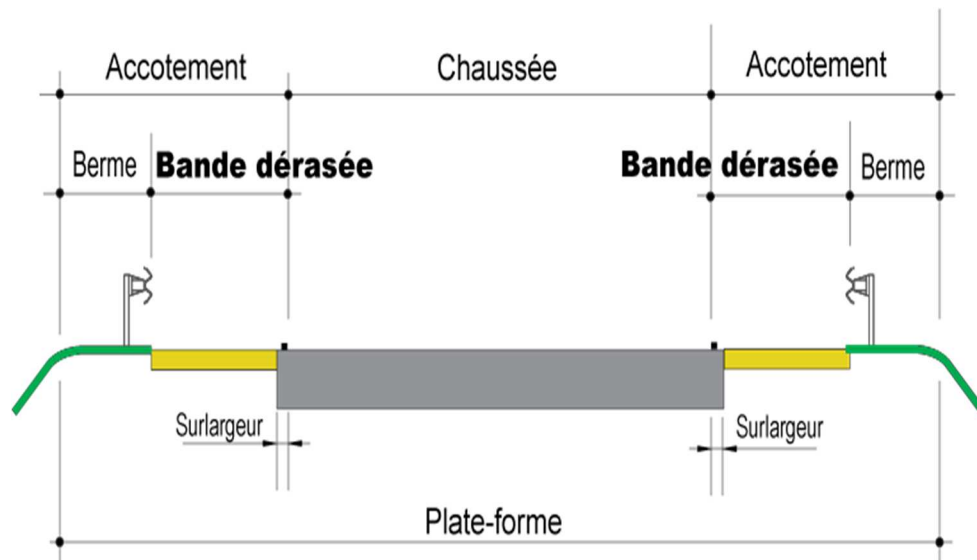


Schéma I-7 : La berme

Les bandes d'arrêt d'urgence (BAU) :

Il s'agit d'une zone libre de tout obstacle, notamment sur autoroute, généralement flanquée à l'extérieur par une berme herbeuse et spécifiquement conçue pour permettre, si nécessaire, l'arrêt ou le stationnement des véhicules.



Figure I20 : La bande d'arrêt d'urgence (BAU)

Ouvrages d'assainissement :

Il s'agit de structures en béton ou en béton armé conçues pour diriger les eaux de ruissellement hors de leur zone d'influence.

On distingue:

Les buses : Ouvrages en béton à section circulaire ;

Dalots: Ouvrages en béton armé à section carrée ou rectangulaire.



Figure I-21 : Buse simple



Figure I-22: Dalot simple



Figure I-23: Buse double



Figure I-24: Dalot double



Figure I-25: Buse triples



Figure I-26: Dalot quatre

I.7. CLASSIFICATION DU PROFIL EN TRAVERS

IL existe deux types de profil en travers:

Profil en travers type ;

Profil en travers courant.

I.7.1. Profil en travers type:

Le profil en travers type est un élément fondamental conçu dans les projets de nouvelles routes ou Il a inclus tous les composants constructifs de la route à venir, dans toutes les circonstances.

(Déblais, Remblais). Son application sur le profil approprié du terrain tout en respectant la cote du Ce projet facilite le calcul de l'avant-mètre des terrassements.

I.7.2. Profil en travers courant:

Le profil en travers courant est un élément fondamental dessiné dans les projets tous les 20 mètres.

En fonction du relief naturel, on distingue trois sortes de profils transversaux : les profils en déblais, en remblais ou encore les profils mixtes. Entretien des routes existantes.

I.8. ROLE ET EVOLUTION DES CHAUSSEES

Distribuer les pressions et les contraintes des véhicules de sorte que la pression finale sur le sol naturel soit inférieure à la capacité portante du sol ;

D'assumer les frais liés aux véhicules ;

Encaisser les fluctuations quotidiennes et saisonnières de température et d'humidité ;

D'évacuer les eaux de pluie vers l'extérieur ;

Les rôles des couches

- La couche de surface

Couche de roulement : s'oppose à l'infiltration d'eau ;

Couche de liaison : résister aux efforts horizontaux des pneus par cisaillement. (accélération, ralentissement, rotation des roues qui ne sont pas entraînées).

Couche d'assise

Couche de base : résisté à la pression verticale ;

Couche de fondation: interface.

Plate-forme support de chaussée (PST)**Couche de forme :**

Uniformiser la portance du sol.

Sol support:

Possibilité de traiter aux liants hydrauliques.

Terrain naturel:

Pour les déplacements à pied et occasionnels obligatoires peu ou pas répétitifs.

Sentier:

Pour les déplacements à pied répétitifs et réguliers.

Piste et chaussée romaine:

Pour des traversées régulières, en groupe à pied ou en véhicule (introduction de la roue).

Piste revêtue:

Pour des traversées régulières de véhicules à vitesse « assez élevée » (présence du véhicule à moteur).

Chaussée souple revêtue:

Pour des passages réguliers de véhicules motorisés à grande vitesse et à charge par essieu. assez faible ».

Chaussées à structures traitées:

Pour un trafic conséquent de véhicules légers et surtout de poids lourds qui doivent circuler en toute saison, en tout lieu et en toute sécurité.

I.9. DIMENSIONNEMENT DE LA CHAUSSEE

Une étude routière ne se limite pas en un bon tracé en plan et d'un bon profil en long, en effet, une fois réalisée, elle devra résister aux agressions des agents extérieurs et à la surcharge d'exploitation :

action des essieux des véhicules lourds, effets des gradients thermiques, pluie, neige, verglas...etc. Pour cela il faudra non seulement assurer à la route de bonnes caractéristiques géométriques mais aussi de bonnes caractéristiques mécaniques lui permettant de résister à toutes ces charges pendant sa durée de vie. [11]

I.10. CONSTITUTION D'UNE CHAUSSEE : LES DIFFERENTES COUCHES

Étant donné leur fonction, les chaussées sont des structures multicouches qui doivent avoir une épaisseur suffisante pour résister sans altération à la pression verticale exercée sur le sol. Étant donné que la pression dans la couche granulaire diminue graduellement avec la profondeur, on peut former une chaussée en superposant des couches à caractéristiques mécaniques de plus en plus élevées. Habituellement, on observe les strates suivantes à partir de la surface du sol [12].

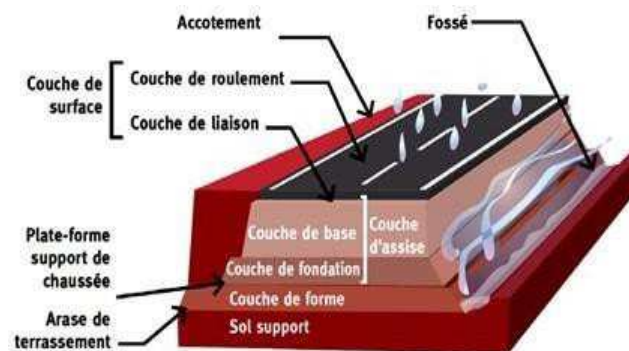


Figure 1-27: Coupe type d'une structure de chaussée et terminologie des différentes couches.[13]

I.10.1. Sol support :

Il est habituellement recouvert d'une couche de forme pour constituer un ensemble connu sous le nom de plateforme de support de chaussée. Comme le suggère son nom, cette dernière sert de support au corps de chaussée.

I.10.2. Couche de forme:

L'élément de transition appelé couche de forme est inséré entre les couches de sol et le sol porteur afin d'améliorer et d'uniformiser la capacité portante du sol. Cette couche n'est pas un élément constitutif de la chaussée, elle est formée soit de matériaux granulaires roulés ou brisés, soit de matériaux traités avec des liants hydrauliques.

Elle a plusieurs fonctions:

Pendant les travaux, elle préserve le sol support, aide au nivellement et facilite le passage des machines de construction.

Elle contribue à homogénéiser les propriétés du sol excavé et à protéger ce dernier contre le gel.

I.10.3.Couches d'assise

La structure de la chaussée est constituée de deux sous-couches : la couche de fondation, suivie par la couche de base.

Couche de fondation:

Elle se compose de gravier concassé 0/40 avec une épaisseur de 20 cm. Elle distribue la pression sur le support, dans le but de conserver les déformations.

Couche de base:

Cette couche, qui est composée de gravier 0/25 et de bitume et possède une épaisseur de 20 cm, résiste parfaitement aux actions des véhicules. Elle permet une atténuation précise de la pression élevée avant que celle-ci ne soit transmise à la couche de fondation.

I.10.4. La couche de surface

Généralement, la couche de surface présente une structure à deux couches :

La couche de liaison:

Le rôle structurel de cette couche est secondaire, à l'exception des chaussées à assise granulaire où la couche de surface est la seule liée.

La couche de roulement:

Il s'agit de la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle sont directement exercées les Attaques combinées du trafic et du climat.

I.11. LES DIFFERENTS TYPES DE CHAUSSEE

I.11.1. Les chaussées souples

Ce sont les structures dites traditionnelles composées d'une couche bitumineuse (BB) mince (< 15 cm) pour la couche de roulement, et d'un corps de chaussée, assise, constitué d'une ou plusieurs couches de grave non traité (GNT). L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm. [14]

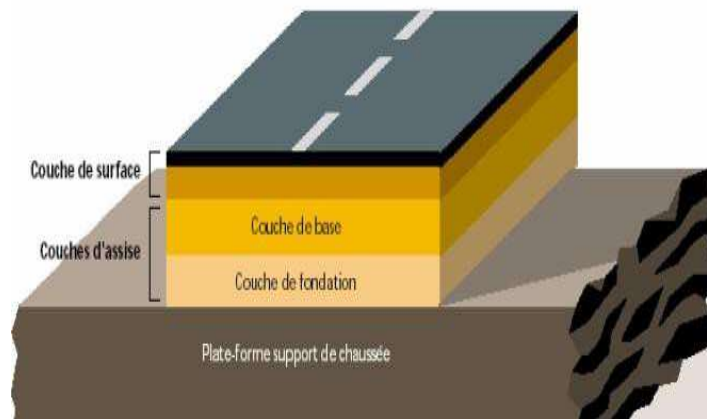
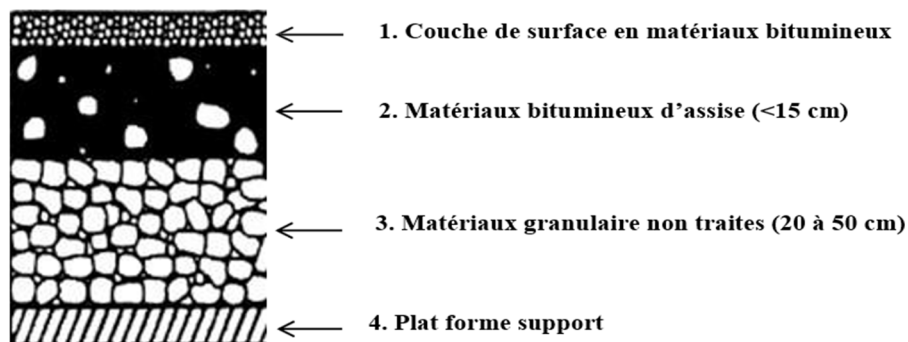
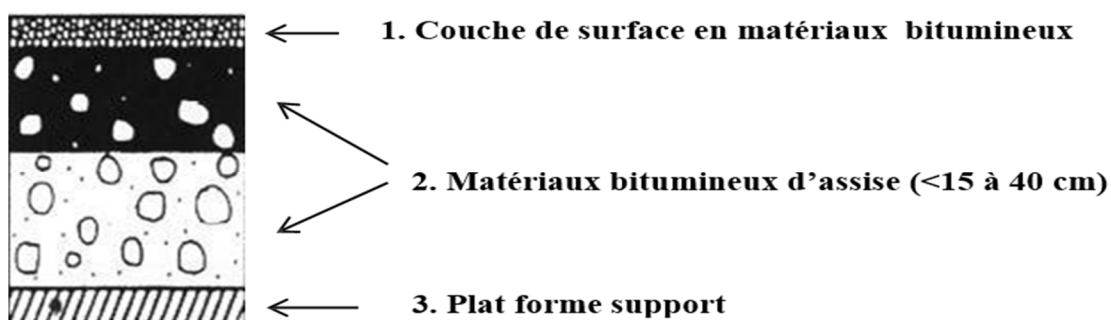


Figure I-28 : Chaussée souple. [15]



I.11.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

Ces structures sont constituées d'une couche de bitume déroulement sur un support de Revêtement composé de matériaux traités avec des liants hydrocarbonés, constitué d'une ou plusieurs couches. L'épaisseur des couches de siège varie généralement entre 15 et 40 cm.



I.11.3. Les chaussées mixtes

Elles sont composées d'une couche de roulement et d'une couche de base en matériaux bitumineux sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques.

Le rapport K de l'épaisseur des matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est de l'ordre de 0,5. Ces structures allient le comportement des deux types de matériaux et limite la vitesse de remontée des fissures.[14]

I.11.4. Les chaussées semi-rigides

Il s'agit de chaussées à assises traitées avec des liants hydrauliques. Elles possèdent une couche de revêtement bitumineux et une ou deux couches de base en matériaux traités avec un liant hydraulique (MTLH), dont l'épaisseur varie de 20 à 50 cm.

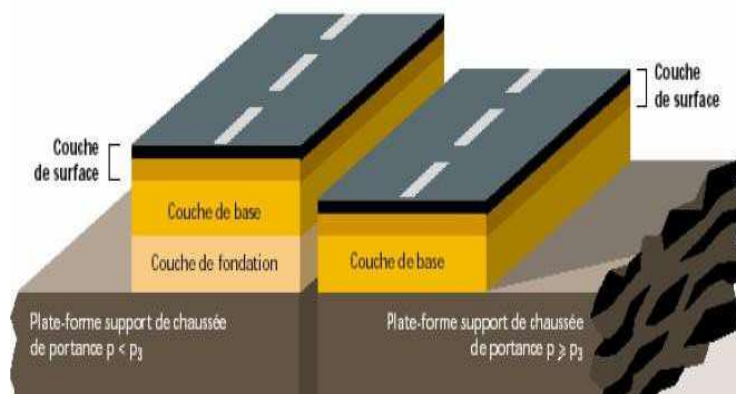
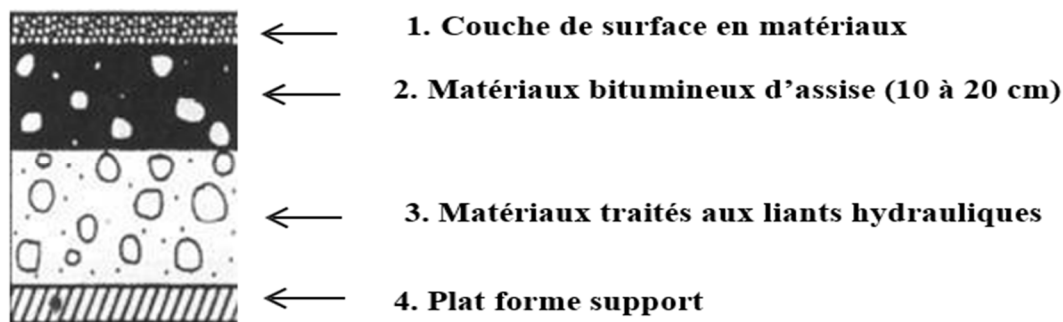


Figure I-29 : Les chaussées semi-rigides [14]

I.11.5. Les chaussées à structure inverse

Leur structure est composée de couches bitumineuses (surface et une couche d'assise) sur une couche de GNT (de 10 à 12 cm d'épaisseur) reposant sur une couche de fondation en MTLH. L'interposition d'une couche granulaire (absente de la structure mixte comportant également une couche de matériaux traités au liant hydrocarboné et une couche de MTLH) permet de réduire efficacement la vitesse de remontée des fissures. Cette structure est une configuration utilisée pour les chaussées autoroutières. [14]

I.11.6. Les chaussées rigides (en béton de ciment)

Ces chaussées disposent d'une couche de base de roulement en béton cimentaire dépassant les Douze centimètres. La couche de béton est posée sur une base qui peut être du MTLH, du béton maigre ou une couche drainante (GNT ou autre) ; alternativement, elle peut être directement déposée sur le support de la chaussée avec interposition d'une couche d'assise bitumineuse (environ 5 cm).

La structure est constituée de dalles goudonnées (prise en compte des joints et bords de dalles dans le dimensionnement), ou de béton armé continu. [14]

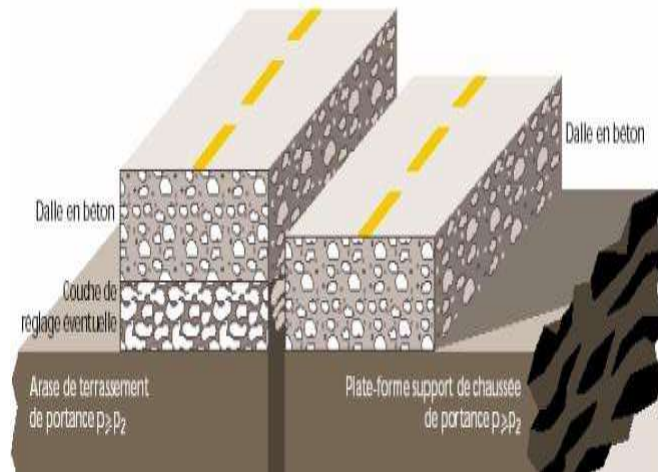


Figure I-30 : Chaussée rigide.[16]

I.12. DEMARCHE DE DIMENSIONNEMENT :

La démarche de dimensionnement reste sensiblement la même quelle que soit la technique de chaussée. [12]

Etape 1:

Consiste à choisir la couche de roulement suivie d'un dimensionnement préliminaire de la structure.

Etape 2:

Modélisation de la structure : cela implique la démonstration de l'empilement de la chaussée suivie du calcul des contraintes et déformations.

Etape 3:

Contrôle de fatigue de la structure et de la déformation du support : les contraintes et déformations calculées doivent être inférieures aux seuils acceptables.

Etape 4:

Régulation des épaisseurs calculées dans le but de :

Prendre en considération les contraintes technologiques relatives à l'épaisseur minimale et maximale pour

réaliser les buts de compacité ;

Réduire les risques de défaillances de collage aux interfaces ;

Prévenir la réapparition des fissures sur les bases traitées.

Etape 5 :

Vérification de la tenue au gel-dégel.

Etape 6 :

Définition de la coupe transversale de la chaussée

I.13. CONCLUSION

La sélection du type de route est cruciale pour réaliser l'objectif pour lequel elle a été conçue. malgré tout ça et sous des différentes facteurs (sous-dimensionnement, surcharge, climat, fatigue), la chaussée et le corps routier sont fréquemment sujets à de nombreuses dégradations, qui causes de multiples dégâts.

CHAPITRE 02 : DÉGRADATION DES CHAUSSÉES

Chapitre 2 : Dégradations des Chaussées

II.1. INTRODUCTION

Dans le secteur des travaux routiers, on peut catégoriser les détériorations en fonction du calendrier du projet (étude où certaines étapes ou défauts cachés peuvent être négligés), réalisation (où l'on est fréquemment confronté à des contraintes comme des sols hétérogènes ou des ressorts liés aux sources d'eau), et exploitation (où surgissent parfois des événements imprévus tels que des conditions météorologiques extrêmes, l'usure et la contamination des matériaux, la longévité... etc.).

II.2. LES PRINCIPALES CAUSES DE DEGRADATION

De nombreux éléments ont un impact sur l'usure des routes. On peut identifier trois catégories : Associées à l'analyse et à la mise en œuvre, la seconde concerne l'influence mécanique (trafic), tandis que la troisième traite de l'impact des intempéries ou des effets chimiques.

II.2.1. Les chaussées revêtues

II.2.1.1. La qualité des matériaux

Elle est d'une importance vitale car il est ardu de construire une route de bonne qualité à partir de matériaux aux propriétés intérieures. Les détériorations associées à la piètre qualité des matériaux peuvent être dues à :

- Une granulométrie incorrecte ;
- Un taux important d'éléments roulés ;
- Une dureté des granulats qui n'est pas suffisante ;
- Des agrégats contaminés (éléments végétaux) ;
- Un nettoyage rapide des granulats de production défaillante (surtout pour les enrobés)
- Un pourcentage incorrect de liants ou de fines ;
- Un mélange insuffisant.

II.2.1.2. La mise en œuvre

Bien que la qualité du liant et des granulats soit irréprochable et que le dimensionnement soit parfait, une exécution défectueuse lors de la manipulation, du compactage ou de l'installation peut aboutir à une structure finale de qualité inférieure. Par conséquent, différentes erreurs d'exécution peuvent entraîner des détériorations aux effets divers.:

Défauts de compacité aux bords : il y a un affaissement sous le poids des camions lourds ; cela entraîne un fluage de la couche inférieure ;

Zones de vulnérabilité en couche inférieure : cela entraîne une rupture du revêtement plus rigide et l'apparition de nids de poule ou de flaques.

L'absence de compacité sur le socle et la plateforme : l'effet direct est la présence de zones de faiblesse qui entraînent des dépressions ou des zones dénudées.

Mauvaise adhérence du revêtement sur la couche de fond : cela peut entraîner un craquèlement de la chaussée, à une pelade du revêtement.. ;

Un compactage trop important des couches de chaussées : cela peut provoquer des ornières.

II.2.1.3 le trafic

L'abrasion de la bande de roulement résulte directement des contraintes de cisaillement qui se produisent lors du contact avec les pneus. Elle provoque principalement des pertes de matériaux, le polissage des granulats, la réduction de la rugosité... Elle est tributaire du trafic., Elle est aussi influencée par l'accroissement du nombre de véhicules et est exacerbée par la présence des poids lourds. Au contraire, la fatigue des couches inférieures découle des efforts verticaux de transmission des charges vers la couche de fondation. Les effets d'attrition, la génération de particules fines et l'accroissement de la plasticité résultent de la récurrence des contacts entre granulés. La rigidité de la surface de roulement s'amointrissant, les déformations sous charge se majorent, deviennent irréversibles et aboutissent à sa destruction plus ou moins rapide. Ces phénomènes de fatigue dépendent non seulement du nombre de répétitions des charges, mais également, et surtout, des charges appliquées sur les essieux. Il est donc primordial de respecter les limites de poids par essieu pour assurer une utilisation optimale de la route conforme aux hypothèses de dimensionnement..

II.2.1.4. Les conditions climatique et effets chimique

L'élément le plus préjudiciable au corps de chaussée est l'existence d'eau. L'eau s'infiltre dans le corps de chaussée.

Par infiltration ;

Par percolation ;

Par remontées capillaires.

Nous sommes conscients que si le taux d'humidité du sol est trop élevé, cela peut entraîner des perturbations majeures en altérant la portance ou en facilitant l'érosion de certains agrégats tels que les

latérites. Les substances traitées avec des liants hydrauliques sont particulièrement réactives au phénomène de dés enrobage. Effectivement, si le liant ne colle correctement aux granulats, l'eau peut se glisser entre les deux. De plus, lorsque les accotements ne bénéficient pas d'une protection, le ruissellement est susceptible de provoquer des ravinements. Il apparaît sur les côtés de la route, à angle droit par rapport à son axe, lorsque la déclivité transversale est excessive.

De plus, nous sommes conscients que les revêtements bitumineux réagissent fortement aux fluctuations de températures. Par conséquent, l'exposition à des températures hautes, non considérées lors de la sélection d'un bitume, pourrait provoquer un vieillissement accéléré de ce dernier..

II.2.2. Les chaussées non revêtues

Les raisons des détériorations sur les routes non revêtues ressemblent à celles observées sur les routes revêtues. Par conséquent, on observe principalement l'impact du trafic, de l'eau et la qualité des matériaux employés. Néanmoins, en raison de l'absence de protection de leurs surfaces de roulement contre les agressions, ces sollicitations ont tendance à s'intensifier. En raison du trafic, la détérioration globale de la couche de roulement est L'apparition de nids de poule est constatée, ainsi que des déformations dans les courbes. Sous l'effet de l'eau, des ravins transversaux et longitudinaux se forment, et les conséquences hydriques peuvent atteindre la plateforme, rendant ainsi le passage des véhicules ardu, voire impraticable.

II.3. LES TYPES DE DEGRADATIONS

Les dégradations les plus souvent observées se regroupent en deux grandes catégories : les dégradations structurelles et les dégradations de surface. Les premières fissures se manifestent dans la structure de la chaussée ou de son support, mettant ainsi en question l'intégrité du patrimoine. Les secondes se forment dans la couche de surface de la chaussée et influencent initialement ses propriétés superficielles.

II.3.1. Les dégradations structurelles (Type A)

Ces derniers définissent une condition structurelle de la chaussée, soit en relation avec toutes les couches et le sol, soit uniquement en rapport avec la couche supérieure. Il s'agit de dégradations résultant d'une capacité structurelle insuffisante de la chaussée. On y observe principalement des déformations et des fissurations dues à la fatigue. [18]

II.3.2. Les dégradations non structurelles (Type B)

Encore appelées dégradations superficielles, elles engendrent des réparations qui généralement ne sont pas liées à la capacité structurelle de la chaussée. Leur origine est soit un défaut de mise en œuvre, soit un défaut de qualité d'un produit, soit une condition locale particulière que le trafic peut accentuer. Dans

les dégradations de type H, on distingue: Les fissurations (hors fatigue), les arrachements et les mouvements de matériaux. [18]

II.4. PROCESSUS DE DÉGRADATION PAR TYPE DE CHAUSSÉES

Dès qu'elle est opérationnelle, la route commence à se détériorer. Quand la couche de roulement est en terre, les anomalies sont généralement frappantes et leur progression est particulièrement rapide. C'est bien établi. Moins évident, par contre, c'est que les chaussées dotées d'un revêtement à base de hydrocarbures se détériorent aussi et qu'elles ne peuvent, tout comme les premières, être négligées sans une surveillance et un entretien minutieux. Concernant les chaussées en béton, elles sont moins exposées aux impacts des conditions météorologiques que les deux autres types, mais leur dégradation est également présente bien que moins importante.

Quoi qu'il en soit, ces troubles présentent une grande variabilité en termes de forme et d'ampleur, influencés par le climat, les types de sols, le trafic routier et les aspects géométriques de la chaussée.

II.4.1. Chaussées revêtues

II.4.1.1. Chaussées souples

Elles transmettent faiblement les contraintes causées par le trafic en les réduisant à un niveau compatible avec la capacité portante du sol. Ainsi, la récurrence de ces contraintes provoquera une déformation plastique de la base granulaire et/ou du sol, conduisant à des déformations permanentes en surface.

Lors de conditions pluvieuses, on peut noter une augmentation de la quantité d'eau présente dans le substrat localisée aux abords de la route. L'absence de rigidité significative de ces chaussées les rend vulnérables à la diminution de portance qui découle de l'augmentation du contenu en eau du support. La couverture bitumineuse, qui repose sur un substrat peu rigide, est soumise à des efforts de traction-flexion à sa base. Sa rupture peut résulter de sa répétition.

Ainsi, le processus de dégradation de ces types de chaussées comportera donc:

L'émergence de déformations permanentes (flaches, affaissements de rive et ornières) qui augmentent en intensité et en étendue ;

L'émergence d'une fissuration longitudinale dans les bandes de roulement, qui se divise, se multiplie et progresse vers un effet de faïençage.

La fissuration facilite les infiltrations d'eau qui intensifient la diminution de la capacité portante du support lors des précipitations, aggravant ainsi les déformations permanentes ; ces infiltrations d'eau accélèrent aussi la progression de la fissuration en provoquant l'éclatement des bords de fissure, des arrachements et finalement l'apparition de nids-de-poule.

De plus, peu importe le type de revêtement (couche superficielle ou tapis d'asphalte), celui-ci se détériore avec le passage du trafic et l'écoulement du temps. Les efforts de cisaillement provoqués par le trafic entraînent l'abrasion des couches de roulement à base d'hydrocarbures par détachement de granulats ou de liant. Le vieillissement du liant sous l'influence du climat contribue à aggraver cette usure.

Ce vieillissement affaiblit le liant et le rend susceptible de se fissurer, éventuellement en raison de simples variations de température ; cela peut entraîner l'apparition d'une fissuration superficielle désordonnée.

II.4.1.2. Chaussées semi-rigides

Étant donné la rigidité extrême des matériaux traités avec des liants hydrauliques, les contraintes verticales appliquées au support du sol sont minimales. Toutefois, l'assise traitée est soumise à des contraintes de traction-flexion qui jouent un rôle crucial dans le comportement de la chaussée. La zone où la couche de roulement rencontre la couche de base ainsi que la partie supérieure de la couche de base sont des régions sensibles qui subissent des contraintes normales et des efforts de cisaillement importants. Ces zones peuvent avoir des propriétés moins robustes que le reste de la structure, en raison des conditions d'application. Cela conduit à une sensibilité accrue de cette région face aux agressions liées au trafic et aux conditions climatiques.

Les fondations traitées avec des liants hydrauliques sont susceptibles de subir un retrait thermique et un retrait de prise. Le retrait engendre des fissures transversales qui, en l'absence de mesures constructives, progressent à travers la couche de roulement. Ces dernières se manifestent à la surface avec des intervalles réguliers et une ouverture qui fluctue avec la température, allant de quelques dixièmes de millimètres à plusieurs millimètres. Souvent visibles dès leur apparition en surface, les fissures de retrait ont tendance à se diviser et à se ramifier sous l'influence du passage des véhicules. Si ces fissures ne sont pas colmatées, l'eau peut infiltrer la structure, entraînant une dégradation de la qualité du joint entre la couche de roulement et la base. Cela entraîne une détérioration progressive de la fissuration et ensuite de la dégradation de la partie supérieure de l'assise. De plus, la capacité limitée à se déformer de ces supports les rend très réactifs aux déplacements, même minimes, de leur base qui entraîneront des fissures (par exemple, tassements ou retrait d'eau du sol...).

En ce qui concerne le revêtement, il est de la même nature que pour les routes souples et l'on observe pratiquement les mêmes phénomènes. Toutefois, sa minceur accentue ces processus et peut entraîner une détérioration rapide de la surface routière.

II.4.1.3. Chaussées rigides

Les chaussées en béton de ciment offrent des avantages indéniables grâce à leur résistance aux charges lourdes lors des périodes de chaleur intense. Cependant, elles sont plus vulnérables aux compressions différentielles de l'infrastructure en raison du danger de fissuration et de cassure des dalles rigides. Sur les routes à fort trafic, l'emploi de granulats robustes et résistants au polissage est indispensable, sinon la sécurité des usagers ne pourra pas être garantie sur le long terme.

Effectivement, en raison du module d'élasticité élevé du béton de ciment, la couche de béton absorbe essentiellement les efforts induits par le trafic par le biais de la flexion. Les contraintes de compression qui sont transmises au sol sont minimales. Toutefois, lors des fluctuations de température et de la prise, le béton connaît des phases de contraction. Le contrôle de la fissuration est habituellement effectué soit par l'établissement de joints transversaux, soit par l'installation d'armatures longitudinales continues.

Sous l'effet du trafic et de l'affaiblissement de la base due aux infiltrations d'eau, les dégradations progressent vers le relèvement de particules fines dans les jointures des plaques ; c'est ce qu'on appelle le phénomène de pompage. L'utilisation de matériaux faiblement érosibles pour la couche de fondation, ainsi qu'un drainage approprié aux interfaces (entre la dalle et son support, entre la dalle et l'accotement), sont des mesures de construction qui aident à prévenir les détériorations des chaussées en béton dues au pompage et au décalage des dalles.

II.4.2. Les chaussées non revêtues

Étant moins protégées que les chaussées revêtues, leur dégradation est directement associée à l'action de deux de leurs principaux adversaires : le trafic et l'eau.

II.4.2.1. Action des véhicules

Il faut faire la différence entre les effets qui se produisent à la surface et ceux qui touchent les couches inférieures de la chaussée. Sur les voies non goudronnées, les premiers sont d'autant plus vulnérables que la cohésion de la couche de roulement est moins forte, c'est-à-dire qu'elle est constituée de matériaux moins plastiques et plus secs. Les particules minces sont présentes dans le tourbillon de poussière généré par les véhicules en déplacement. Les plus grands demeurent sur la plateforme où ils façonnent la tôle ondulée.

Des canyons longitudinaux se créent rapidement, où les véhicules sont dirigés, ce qui amplifie le processus et aboutit à un profil en W typique des routes usées. De plus, ces frayées nuisent rapidement à l'assainissement et il est courant que, dans les sols sablonneux, la route se retrouve vite sous le niveau du sol naturel.

En fonction de l'élargissement de la plateforme, des protubérances de plus en plus élevées se créent, rendant les intersections de plus en plus périlleuses. Le processus s'effectue particulièrement vite sur les routes dont la déclivité transversale dépasse 4%, ce qui pousse les véhicules à rester près de leur axe.

En ce qui concerne les courbes, elles représentent des zones où les efforts tangents sont particulièrement élevés, surtout lorsqu'elles ont un rayon court. Il est courant que les matériaux éjectés vers l'extérieur forment un bourrelet qui s'établit sur la largeur, rendant son utilisation impossible en augmentant l'inclinaison du dévers. Le phénomène est également amplifié par les petites ravines transversales, qui représentent le mal courant de tous les virages.

II.4.2.2. Action de l'eau

En général, tout sol non saturé d'eau possède une bonne portance et même si sa plasticité est élevée, cela ne pose pas de problème pour la circulation. Cependant, des matériaux hautement plastiques comme l'argile saturée d'eau deviennent glissants et s'effondrent en raison de leur manque de portance. On peut observer deux phénomènes notables :

Les eaux stagnantes ;

Le ruissellement des eaux ;

Les eaux stagnantes.

Elles s'infiltrant dans le volume des remblais soit par le haut (eau de pluie), soit par le bas (remontées capillaires). Ainsi, elles transforment les propriétés mécaniques du sol, diminuent sa résistance, et engendrent des perturbations internes comme le compactage, les glissements et même l'effondrement de remblais jugés stables.

Les eaux de ruissellement Elles sont habituellement propulsées à grande vitesse et usent la surface de la route. L'importance des ravinelements causés par ces eaux est accrue par leur grande vitesse et l'absence de cohésion dans les terrains.

Durant la saison des pluies, les routes subissent l'influence des véhicules, à laquelle se joint celle de l'eau qui contribue et précipite leur détérioration. Ces derniers sont d'autant plus cruciaux que les sols sont majoritairement argileux (comme dans le cas des matériaux latéritiques). En revanche, les sols pauvres dominés par le sable se comportent très bien durant la saison des pluies. Les

détériorations causées par cette action conjointe se révèlent à la fois en surface et en profondeur :

En surface:

L'eau rend les matériaux argileux détrempés, savonneux et glissants. L'existence de trous sur la chaussée entraîne des accumulations d'eau qui mettent en péril la fondation.

En profondeur:

Les eaux pénétrant dans la masse des remblais altèrent la résistance mécanique de ces derniers. [19]

II.5. DÉGRADATION SUR LES CHAUSSÉES REVETUES**II.5.1. Dégradations sur les chaussées à revêtement bitumineux**

Nous classons les dégradations sur les routes revêtues en quatre catégories principales (ou familles) qui sont:

II.5.1.1. Les déformations

Il s'agit de dépressions ou ondulations routières qui apparaissent habituellement dans le substrat de la chaussée ou dans le sol porteur et qui deviennent visibles sur la surface de roulement. On les distingue en fonction de leur forme et de leur emplacement. On identifie les suivants types de dégradations :

Les dépressions, les creux et les saillants.

Les affaissements

Il s'agit de dépressions très marquées et généralement assez vastes, situées soit sur les rives (Affaissements de rives) ou sur toute la largeur de la route (Affaissements hors rives). On les appelle flaches lorsqu'ils ont une forme circulaire.

Causes possibles :

Inadéquation de l'épaisseur du corps de chaussée (épaisseurs insuffisantes) ;

Affaissements différentiels (problème de portance du sol) ;

Zones de déblaiement d'argile ou régions marécageuses ;

Structures défectueuses

Insuffisance de drainage

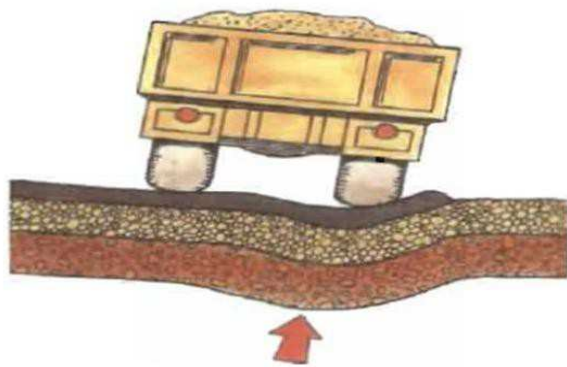
Chaussée sans butée sur le côté ;

L'eau est présente en raison de la perméabilité des strates supérieures ;

Route étroite.

Améliorations envisageables :

L'un des premiers effets des affaissements est la rétention d'eau, ce qui peut conduire à une réduction de l'adhérence. Cela entraîne une pénétration d'eau dans la structure routière suivie d'une désagrégation des granulats. La flache conduit finalement à un faïençage qui se dirige vers la formation d'un nid de poule en raison de l'érosion des matériaux. La détérioration peut entraîner une rupture de la route pendant la saison des pluies.



Schématisation d'un affaissement



Figure II-1 : les affaissements. [20]

Le processus d'orniérage :

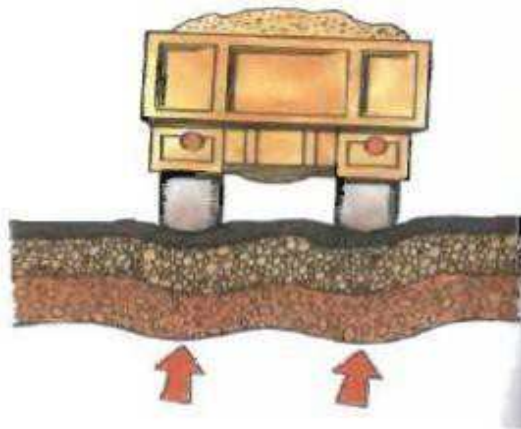
Il s'agit d'une dépression localisée qui se forme sous le passage des véhicules et peut toucher soit la couche de roulement, soit le corps de chaussée, avec une possibilité d'extension sur des longueurs considérables. Sous certaines circonstances, une ornière profonde peut s'avérer périlleuse, rendant la circulation hasardeuse. Ce phénomène dépend également de la vitesse des véhicules, des catégories de pneus, de l'état d'usure des pneus et de l'inclinaison latérale de la route.

Causes possibles :

- Une insuffisance dans la dimension du corps de chaussée qui lui confère une résistance inadéquate ;
- Une insuffisance dans le compactage lors de la mise en œuvre ;
- Une diminution de la portance des couches sous-jacentes du revêtement ;
- Carences dans le revêtement : bitume trop tendre ou surdosage, enrobé pas assez résistant pour supporter le trafic lourd, compactage inadéquat lors de l'installation.

Possibilités d'évolution:

Il arrive que les ornières soient associées à des fissures, ces dernières étant d'autant plus larges lorsque le dommage est important. Effectivement, si de l'eau s'infiltre dans le corps de la chaussée, le processus d'orniérage risque de se précipiter et pourrait mener à une fissuration ou à une détérioration de la chaussée.



Schématisation d'une ornière



Figure II-2 : l'orniérage.

Les bourrelets

Il s'agit de mouvements horizontaux du revêtement routier qui produisent un gonflement allongé dans le sens du trafic. Ils sont souvent associés à des ornières.

Causes possibles :

L'usure de la route causée par le passage de véhicules dont le poids dépasse la capacité portante de la chaussée.

Compactage des strates inférieures .

Problème de compactage lors de la construction.

L'infiltration d'eau provoque une réduction de la capacité portante du corps de chaussée.

Matériaux de piètre qualité .

Qualité insatisfaisante du revêtement à base de bitume .

Il y a un manque d'adhérence entre la couche de bitume et la couche sous-jacente.

Possibilités d'évolution:

L'évolution du bourrelet est en rapport avec celle de l'orniérage. Ainsi, ils sont fréquemment accompagnés d'extrusion de matériaux mous sous l'effet de la déformation et d'une destruction progressive de la chaussée. Il peut aussi en résulter une fissuration et ou arrachement de la couche de surface. Un défaut d'uni est aussi souvent constaté. [21]



Schématisation d'un bourrelet



Figure II-3 : les bourrelets. [21]

II.5.1.2 Les fissurations

Il s'agit de fissures de divers degrés sur la route qui affectent la couche de roulement et/ou l'intégralité du revêtement routier. On fera la distinction entre les fissures longitudinales, les fissures transversales et les faïençages.

Les fissures transversales

Il s'agit de fissures généralement perpendiculaires à l'axe de la route, isolées ou périodiques, avec un espacement variable, touchant en totalité ou partiellement la largeur de la chaussée. Selon l'origine et la manière de leur apparition, on les classera en fissures de retrait, fissures de joints et fissures de fatigue.

Causes possibles :

Le désengagement causé par l'utilisation d'assises traitées avec des liants hydrauliques en raison de variations thermiques ; la fissure se propage à travers la couche superficielle.

Un vice dans l'application de la couche de roulement (comme un collage défectueux entre les bandes lors d'une reprise de répannage pour les fissures de joint) ;

L'altération du liant due à l'âge ou la réactivité du bitume face aux changements de température ;

L'usure progressive de la chaussée causée par la répétition des sollicitations ou une insuffisante épaisseur d'une ou plusieurs couches ;

La réduction de la capacité portante du sol support (drainage insuffisant, problème d'étanchéité de la surface).

Possibilités d'évolution:

Les fissures transversales se manifestent soit sur toute la largeur, soit à l'emplacement où les roues des véhicules passent, pour couvrir l'ensemble du profil transversal. Par conséquent, elles peuvent s'accroître au fil du temps. Initialement, ces fissures sont minimales, mais elles peuvent se diviser et créer des éclats sur les bords. Elles évoluent ensuite vers le craquelage, la fente et le début de la dégradation des matériaux, conduisant ainsi à une destruction étendue ou localisée de la chaussée.



Figure II-4 : les fissures transversales

Les fissures longitudinales

Il s'agit d'une catégorie de détériorations de surface où une ligne de fissure se manifeste à la surface de la chaussée, presque en alignement avec l'axe.

Causes possibles :

Mauvais assemblage du joint longitudinal entre deux bandes d'enrobés ;

Mouvement différentiel lors de l'élargissement de la route ;

Fatigue de la route causée par une structure inadéquate face au trafic ou une capacité portante du sol insuffisante ;

Les propriétés du sol : compactage, retrait de l'argile suite à une longue sécheresse (Assèchement).

Evolutions possibles:

Elles se développent vers une érosion des bords de fissure qui facilite l'infiltration de l'eau, entraînant une ramification suivie d'une duplication de la fissure avec l'élargissement des lèvres associé à la perte de matériaux en bordure de fissure. L'évolution entraîne un craquage à petites mailles, un creusage et des trous d'eau lorsque les fissures sont attribuables à une résistance inadéquate des matériaux sous-jacents.



Figure II-5 : les fissures longitudinales.

Le faïençage

C'est un réseau de fissures entrecroisées ou maillées, dont la largeur varie à la surface de roulement. Les mailles peuvent se présenter sous une forme circulaire ou polygonale, généralement dénommée « peau de crocodile ».

Causes probables:

Mauvaise exécution ;
Inadéquation de l'épaisseur du corps de chaussée (épaisseurs non conformes) ;
Usure de la couche de roulement ou de l'ensemble de la route (Charges de cisaillement excessives causées par le trafic lourd) ;

Durcissement et retrait de l'enrobé, caractérisant le vieillissement du liant ;
Détachement de la couche de roulement sur la couche de base.

Evolutions possibles:

En absence d'une maintenance régulière, on observera un resserrement des zones en faïence. Le faïençage se développe alors en une détérioration des matériaux (provoquant la création de pelades ou de nids de poule) et/ou une diminution de la portance causée par l'infiltration de l'eau dans la structure routière.



Figure II-6 : le faïençage.

II.5.1.3. Les arrachements

Il s'agit de phénomènes de déliaison entre des éléments ou sections de la route, généralement suivis de leur disparition. Ces dégradations n'impactent initialement que la couche de roulement lors de leur apparition, mais peuvent se détériorer davantage en touchant les couches sous le revêtement. On identifie les troubles suivants : le désenrobage, le plumage, le peignage, la pelade, l'indentation et le glaçage, les nids de poule, les dentelles de bords et les réparations.

Le désenrobage, le plumage et le peignage

C'est une triade de phénomènes si étroitement connectés qu'il serait inapproprié de les aborder individuellement. Le désenrobage se réfère à l'élimination de la couche de liant qui entoure les granulats d'une surface revêtue d'enrobé. En raison du trafic, on observe une détérioration des gravillons qui rend la surface de roulement rugueuse : il s'agit du plumage. En ce qui concerne le peignage, cela implique également une extraction des gravillons du revêtement en suivant des lignes parallèles à l'axe de la route.

Causes probables:

- Qualité déficiente des enrobés (insuffisance de bitume ou enrobage inapproprié);

- Faible adhérence entre le liant et le granulat ;

- L'usage de granulats hydrophiles ;

- Le liant se détériore au fil du temps ;

- Mise en œuvre dans des conditions météorologiques défavorables, notamment lors de températures élevées ;

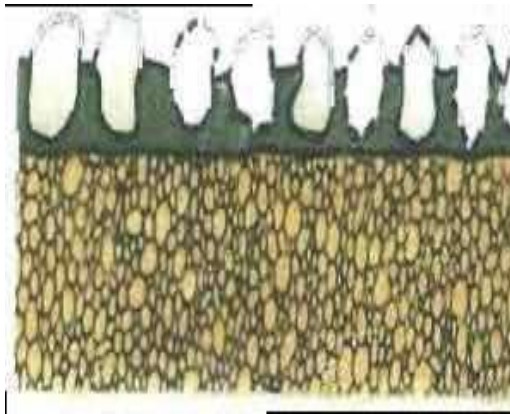
- Accumulation d'eau sur la route ;

- Usure par trafic intense;

- Insuffisance de compactage dans la couche de roulement .

Évolution possibles:

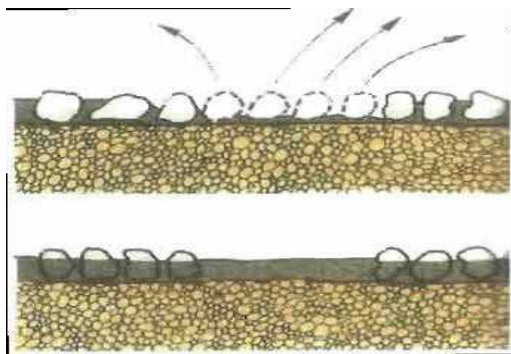
Si aucune opération d'entretien n'est effectuée, le désenrobage évolue en surface et en profondeur. On assiste alors à un arrachement des gravillons, puis à l'apparition de nids de poule. [19]



Schématisation Plumage



Figure II-7 : Plumage. [19]



Schématisation Peignage



Figure II-8 : Peignage. [19]



Figure II-9 : Les arrachements.

La pelade

C'est un détachement du revêtement par des plaques de tailles variable.

Causes probables:

Problème d'adhérence de la couche de roulement (nettoyage inadéquat avant l'application travail, mauvaise, réalisation, présence d'eau à l'interface) ;

Manque ou insuffisance de la couche d'adhésion ;

La couche de surface est trop mince.

Route fortement sollicitée par la circulation.

Évolutions possibles:

La pelade se manifeste par une élimination graduelle de la couche superficielle. Elle est également associée à une détérioration de l'étanchéité et de l'unicité. Elle se termine finalement par des nids de poule si elle n'est pas réparée rapidement.



Figure II-10 : la pelade.

L'indentation et le glaçage

C'est un phénomène d'usure sans déchirure ou de tassement des granulats de la couche de roulement qui donne à la surface un aspect poli et brillant.

Causes probables:

Insuffisance de la dureté des granulats du revêtement ;

Pertes de granulats en surface ;

Excès de liant dans l'enrobé ;

Le liant n'est pas adapté au climat ou au trafic ;

Compactage à une température extrêmement élevée ;
Action mécanique résultant du trafic.

Evolutions possibles:

L'évolution du phénomène conduira à une augmentation de l'usure des gravillons, rendant la chaussée de plus en plus glissante sous la pluie. On observe une propagation du déséquilibre sur les bandes de roulement, et même l'émergence d'ornières accompagnées de bourrelets transversaux et longitudinaux.

Les nids de poule

Il s'agit de désagréations localisées du revêtement sur toute son épaisseur, créant des cavités généralement rondes, aux contours nettement délimités, présentant des dimensions et des profondeurs variées. Ils illustrent la phase finale d'un faïençage, d'une flache, d'un plumage ou d'une pelade. Au-delà d'être une simple nuisance, ils représentent souvent un risque considérable pour la circulation et posent un véritable problème pour l'assainissement. Au Sénégal, les us sont souvent considérés comme l'une des dégradations les plus courantes.

Causes probables:

Un défaut localisé dans la couche de roulement ou de base lors de la production ou de l'application
Travail des matériaux ;

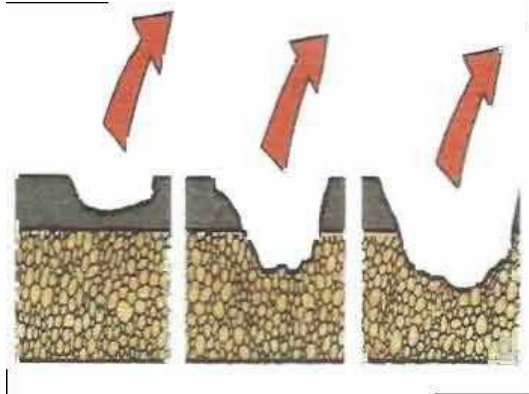
Revêtement d'épaisseur insuffisante ;
La couche de roulement présente une perméabilité élevée ;
La dégradation et l'élimination de matériaux dues à une qualité inférieure de la chaussée ;

Ils représentent fréquemment la phase finale d'autres détériorations (comme le faïençage, le flache, le désenrobage, les pelades...).

Évolutions possibles:

Les nids de poule tendent à se développer en termes de dimensions et de quantité de trous, conduisant à la dégradation complète de la route. On observe également une importante pénétration d'eau dans le corps

de chaussée. C'est pour cette raison qu'il est impératif de s'occuper des zones dévastées dans les plus brefs délais.



Schématisation nid de poule



Figure II-11 : les nids de poule.

Les dentelles de rives

Aussi connues sous le nom d'épaufrures, ces fissures sur les bords de la chaussée entraînent une diminution significative de sa largeur allant parfois jusqu'à sa disparition totale. C'est une occurrence souvent observée sur les routes du Sénégal.

Causes probables:

- Usure de la couche de roulement à partir des bords de la route ;
- Drainage inadéquat des eaux : l'effet de bord provoque une diminution de la portance aux alentours le bas-côté ;
- Manque de limiteur de côté ;
- Rives insuffisamment compactées;
- Véhicules qui s'immobilisent régulièrement sur les bas-côtés ;
- Arrêts fréquents de véhicules sur les accotements ;
- Virages mal conçus : des virages trop étroits forcent les pilotes à utiliser les bas-côtés, provoquant ainsi une usure transversale.
- Rajeunissement prononcé du revêtement.

Evolutions possibles:

L'évolution peut se manifester de diverses manières : l'érosion de la couche de roulement et des couches sous-jacentes mettant sérieusement en danger la section de la chaussée. Ce processus d'érosion continue au fil du temps, conduisant à l'élimination totale de la couche de roulement.

Les réparations

Ce sont des réparations spécifiques, qui impliquent une ou plusieurs couches de revêtement et montrent des détériorations variables sur leur surface ou leur périmètre. Le diagnostic comprend des aspects tels que le nombre, l'ampleur et la fréquence dans le temps.

Causes probables:

Non-respect de l'utilisation des matériaux d'apport (problème courant de sous-compaction).

Évolutions possibles:

Elles sont identiques à celles qui existent pour les détériorations visibles sur la surface de la réparation.



Figure II-12 : Exemple de réparation. [22]



Figure II-13 : Réparation dégradée. [22]

II.5.1.4. Les mouvements de matériaux

Ces détériorations se manifestent par la migration du liant vers la surface de la route, l'enfoncement des gravillons dans le revêtement, l'apparition de particules fines à la surface, Ou

encore l'expulsion de l'eau à la surface lorsqu'un véhicule lourd passe sur des cavités présentes sous la couche superficielle. On observe la présence de ressuage et de remontées de fines.

Le ressuage

Il s'agit d'une réapparition du liant à la surface de la couche de roulement, qui recouvre partiellement ou complètement les granulats et confère un aspect brillant noiré. Lorsque sa présence est marquée, des plaques glissantes extrêmement dangereuses pour le trafic peuvent se créer.

Causes probables:

- Excès (mauvaise formulation) du liant dans la couche de roulement ;
- Bitume trop souple (liant inapproprié) ;
- Visibilité du liant situé sous la couche d'usure (ancien revêtement par exemple) ;
- Section exposée à un ensoleillement intense pour la viscosité du liant ;
- Sélection incorrecte des granulats ;
- Compactage excessif.

Évolutions possibles:

Le phénomène de ressuage se détecte initialement par l'émergence des marques de roues sur la route lors des périodes de chaleur. Il se dirige vers un décollement et un détachement de la couche superficielle sous l'influence du mouvement. Cela entraîne un démarrage de nids de poule. Il convient de mentionner que la route devient glissante lorsque le temps est humide.



Schématisation ressuage



Figure II-14 : le ressuage. [22]

Les remontées de fines

Ceci concerne l'expulsion de substances (eau, boue...) issues de la structure routière et remontant à travers les points défailants de la couche de roulement (fissures, enrobé perméable).

Causes probables:

La progression et l'infiltration de l'eau entre les strates de la chaussée ;
Drainage insuffisant du corps de chaussée ;
Insuffisance de cohésion et sensibilité à l'eau du substrat ;
Anomalie d'interface favorable à l'écoulement de l'eau.

Évolutions possibles:

Les remontées peuvent induire un manque d'adhérence au niveau de l'interface chaussée-pneumatiques par la présence de zones humides à la surface. Elles évoluent vers une destruction progressive de la chaussée sous l'action de l'eau, à une désagrégation des matériaux du corps de chaussée par suite de sa désorganisation et à un désenrobage des granulats. A long terme, des nids de poule peuvent apparaître à la surface de la chaussée à cause de la baisse de portance de l'assise. [17]



Figure II-15 : les remontées de fines. [23]

II.5.2. Dégradations sur les chaussées en béton**II.5.2.1. Les fissurations**

On identifie deux catégories de fissures : d'une part, les fissures longitudinales, transversales et obliques, d'autre part, les fissures aux coins de la dalle. Tous ces cas concernent des ruptures de dalle en deux segments. Toutefois, les fissures angulaires sont liées à la rencontre de la fissure

avec les limites de la dalle, formant ainsi un triangle dont les deux côtés de l'angle droit représentent les bords de la dalle.

Causes probables:

Portance insuffisante (dalle trop mince, béton à la traction pas assez résistant...);

Détérioration des conditions de support de la dalle (affaissement ou érosion du sol de fondation);

En cas de sciage tardif, recours au retrait thermique du béton;

Retrait hydrique;

Rupture de la chaussée due à la fatigue causée par l'accumulation de contraintes excessives de traction et de flexion.

L'espacement entre les joints est trop grand;

Gonflement ou retrait du sous- sol.

Évolutions possibles:

On assiste à une ouverture de la fissure et à l'épaufrure des lèvres favorisant un départ de matériaux et une infiltration d'eau dans le corps de chaussée. Par suite, les battements de dalles provoqués par le trafic lourd entraînent en plus des rejets de pompage. Cette ouverture est limitée pour le béton armé continu jusqu'à rupture des armatures. Il peut aussi se produire une ramification de la fissure et les coins de dalles contigus à la fissure peuvent se casser. [18]



Figure II-16: Réseau de fissures de formes diverses. [23] Figure II-17 : Fissures en coin de dalle. [23]

II.5.2.2. Les épaufrures

Il s'agit de morceaux qui se sont séparés de la masse du béton près des joints ou des fissures. Habituellement, cette détérioration touche uniquement une section de l'épaisseur de la dalle.

Causes probables:

Joints bloqués (présence de matériaux non compressibles) qui empêchent l'expansion thermique et génèrent une compression à la périphérie, entraînant leur fragmentation;

On observe la présence de zones vulnérables au niveau des articulations

Insuffisance de la résistance à la compression du béton ;

Dégradation locale du béton due à une coupe anticipée ;

Friction des lèvres des joints causée par les coups de dalle.

Evolutions possibles:

Les épaufrures deviennent de plus en plus nombreuses et larges et évoluent vers la fragmentation en dalles de plus en plus petites. Elles sont aussi accompagnées d'un affaissement de ces dalles et de départs matériaux.

On note enfin une accentuation du phénomène par pénétration d'eau dans le corps de chaussée. [19]



Figure II-18 : les épaufrures.

II.5.2.3. Les décalages de joint (de dalles ou de fissure)

C'est une différence de hauteur entre les deux bords d'une jointure de dalle ou de fissure.

Causes probables:

Erodabilité de la base.

Mauvais transfert de charges au niveau des joints transversaux ;

Insuffisance de la portance et/ou de la cohésion du sol support entraînant un tassement inégal ;

Déplacements de matériaux sous les deux bords du joint causés par un effet de pompage, de retrait d'humidité ou un drainage insuffisant.

Evolutions possibles:

Les déformations de joint entraînent une modification des conditions d'opération de la dalle (transfert de charge) et affectent l'unité. Ils progressent vers une érosion des bords ou des joints des fissures, des décharges fines suite aux infiltrations d'eau dans le corps de la chaussée, et également vers une fissuration transversale ou oblique.



Figure II-19 : Exemple de décalage. [24]

II.5.2.4.Le pompage

Ceci fait référence à l'expulsion de substances (eau, boue...) à la surface de la route lors du passage de poids lourds, au niveau des fissures ou des jointures en raison de la présence de cavités sous les dalles.

Causes probables:

Mauvais évacuation des eaux sur la chaussée

Absence de cohérence et la réactivité du matériau à l'eau ;

Dégradation des conditions de support de la dalle en présence d'eau à cause des sollicitations dynamiques (les vibrations de la dalle sous charge entraînent des mouvements d'eau sous pression aux points de contact dalle-fondation, ce qui provoque des remontées d'eau et de fines à travers les joints ou les fissures).

Evolutions possibles:

Il se dirige vers la création de cavités aux extrémités des dalles. Ces cavités provoquent des vibrations de dalles dues au passage de la circulation lourde, ce qui intensifie les rejets de pompage.

À un moment donné, des phénomènes de mise en escalier et de fissuration des dalles peuvent se produire.



Figure II-20 : Pompage caractérisé par l'humidification de la chaussée aux bords des joints.

II.6. DÉGRADATION SUR LES CHAUSSÉES NON REVETUES

II.6.1. Les déformations Les ornières

Il s'agit de déformations localisées qui se manifestent sous le passage des véhicules, avec ou sans formation de bourrelets, et qui peuvent toucher intégralement la couche de roulement sur des distances considérables .

Causes probables:

Sous dimensionnement de la chaussée ;

Compactage insuffisant ;

Humidité importante dans les couches inférieures de la chaussée ;

Manque ou insuffisance de drainage;

Des pertes de matériaux sous les marques des roues.

Evolutions possibles:

Lorsque la couche de roulement présente des faiblesses, les ornières peuvent provoquer la formation de ravinements et de nids de poule.



Schématisme d'ornière



Figure II-21 : les ornières. [25].

La tôle ondulée

Il s'agit de l'une des affections les plus courantes sur les routes en terre, en particulier lorsqu'elles sont revêtues de latérite. Elle implique une disposition des éléments non fixés de la chaussée en bandes perpendiculaires à l'axe routier, touchant l'intégralité de la plateforme et même ses sections les moins fréquentées. La route présente une apparence ondulée, avec des vagues très uniformes tant en écart qu'en hauteur, ces dernières étant influencées par le type de revêtement et le volume de trafic.

Causes probables:

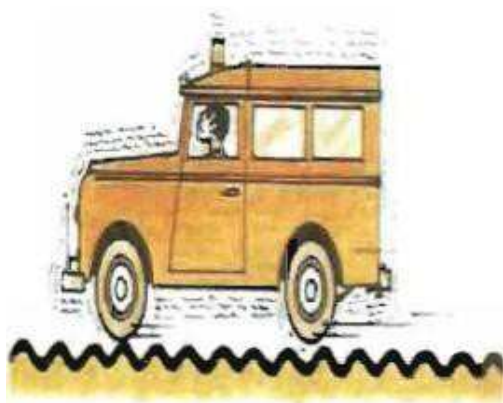
Instabilité de la couche de roulement : en période sèche, les particules fines se décomposent en poussière, créant un squelette dépourvu de cohésion. Durant la saison des pluies, les particules fines développent une plasticité excessive qui nuit à la durabilité de la chaussée.

Le non-respect du poids maximal autorisé par essieu (oscillant entre 9 et 13 tonnes) : cela provoquera une hausse de la pression des pneumatiques qui entraînera une usure accrue de la bande de roulement au-delà des spécifications dimensionnelles, ce qui conduira inévitablement à l'émergence de certaines détériorations, notamment la création d'ondulations sur le revêtement;

La circulation : le volume de circulation et la vitesse des véhicules ont un impact sur la vitesse de formation et l'étendue de la tôle ondulée. Au-delà d'un certain volume de circulation quotidienne, la route en terre ne peut plus résister au passage des véhicules. Il est nécessaire d'effectuer le bitumage de la route.

Evolutions possibles:

L'élargissement de la fluctuation s'accroît avec le temps, amplifiant ainsi l'insécurité et réduisant le confort. Sur le long terme, elle tend à provoquer le détachement des matériaux, conduisant à l'apparition de nids de poule après les premières pluies.



Schématisation de tôle ondulée



Figure II-22 : la tôle ondulée. [25]

Les bourbiers

On parle ici de dégradations localisées, caractérisées par la plastification du matériau composant le corps de la chaussée, sous l'influence combinée du trafic et de l'eau (de ruissellement ou interne).

Causes probables:

Assainissement défectueux : ouvrages d'art en état dégradé ou absents, ce qui se manifeste par des accumulations d'eau sur la surface de roulement.

L'emploi de matériaux majoritairement argileux : la saturation de la chaussée par l'eau entraîne une plasticité de la couche de roulement. Le sol commence à être glissant et les roues des voitures y laissent de plus en plus d'empreintes, ce qui favorise la stagnation et l'infiltration de l'eau.

Évolutions possibles:

Si aucune opération d'entretien n'est effectuée dès l'apparition des bourbiers, on assiste à une destruction progressive de la chaussée provoquant l'enlèvement des véhicules.



Figure II-23 : bourbier.

II.6.2. Les arrachements**Le ravinement**

C'est l'érosion longitudinale (ravine longitudinale) ou transversale (ravine transversale) de la chaussée due à un écoulement qui se produit sur celle-ci faute d'une évacuation appropriée dans le réseau d'assainissement. L'érosion dépend de la quantité d'eau en jeu et de la rapidité de son flux.

Causes probables:

Érosion de la surface de roulement due au ruissellement des eaux ;

Des pentes longues et/ou excessivement raides qui permettent à l'eau d'atteindre la vitesse critique d'érosion.(vitesse au-delà de laquelle les phénomènes d'érosion commencent à apparaître) ;

Matériaux peu stables donc susceptibles à l'érosion ;

Assainissement défaillant : fossé insuffisant en taille, sorties d'eau absentes ou trop peu fréquentes ;

Mauvaise gestion des accotements : la croissance désordonnée de la végétation provoque une montée du niveau des accotements en raison de l'accumulation de terre et de débris végétaux, ce qui renvoie l'eau sur la route où elle s'écoule;

Ruissellement d'eau dans les ornières.

Évolutions possibles:

Les petites gouffres, qui se creusent constamment, finissent par se transformer en réelles fosses impraticables pour les véhicules, créant ainsi un risque réel pour les conducteurs.



Figure II-24 : le ravinement. [25]

Les nids de poule

Il s'agit de cavités de forme ronde avec des bords plus ou moins nets sur la surface du revêtement. Ils se distinguent par une expulsion massive de matériaux de la couche de roulement et ont généralement une tendance à s'élargir rapidement et à se diffuser en grappes.

Causes probables:

Des segments localisés de matériaux (comme des gravillons) constituent donc l'origine de la formation des nids de poule.

Qualité du sol de la plateforme insuffisante;

Irrégularité et mauvaise densité du matériau de surface ;

Conditions de drainage et d'assainissement défectueuses.

Évolutions possibles:

Le défaut croît avec le débit du trafic et avec l'agressivité des véhicules entraînant un approfondissement et un élargissement des trous. Leur formation est d'autant plus rapide et fréquente que la fondation est insuffisante et, par conséquent, les déflexions importantes et les couches superficielles davantage sollicitées. S'en suit une accumulation d'eau pendant la saison des pluies fragilisant ainsi le corps de la chaussée et constituant une gêne pour la circulation



Figure II-25 : les nids de poule.

II.7. CONCLUSION

La dégradation est un phénomène qui évolue en fonction du temps, donc l'entretien doit suivre ce phénomène « l'entretien est une opération continue dans le temps »

CHAPITRE 03 :
LES MODÈLES DE
COMPORTEMENT ET
L'OUTIL
NUMÉRIQUE UTILISÉ

Chapitre 3 : Les Modèles de Comportement et l'Outil Numérique Utilisé

III. 1Aperçu de la méthode des éléments finis

III.1.1 Introduction

L'évolution technologique pousse les ingénieurs à concevoir des projets de plus en plus complexes, onéreux et soumis à des exigences de sécurité toujours plus strictes. Face à la complexité des méthodes analytiques classiques en résistance des matériaux, ils se tournent vers des méthodes capables de simuler le comportement de systèmes physiques complexes. Bénéficiant des progrès réalisés en informatique ainsi que des avancées mathématiques en théorie de l'énergie, en méthodes de projection et d'approximation, la méthode des éléments finis (MEF) s'est imposée comme la technique numérique la plus performante, grâce à son large champ d'application. Elle est aujourd'hui utilisée dans de nombreux secteurs industriels : aéronautique, nucléaire, génie civil, construction navale, mécanique, offshore, etc.

La MEF est une méthode récente, pluridisciplinaire, mobilisant des connaissances issues de trois domaines fondamentaux :

1. La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité...
2. L'analyse numérique : méthodes d'approximation, résolution de systèmes linéaires, analyse de problèmes aux valeurs propres...
3. L'informatique appliquée : conception et maintenance de logiciels complexes. [34].

III 1.4 Calculs par la MEF

La méthode des éléments finis est particulièrement adaptée à la modélisation de problèmes géotechniques complexes. Sa mise en œuvre exige :

- La définition précise de la géométrie du problème, afin que les frontières n'influencent pas les résultats.
- Le choix d'une loi de comportement appropriée pour le sol, comme Mohr-Coulomb ou Cam-Clay.
- La description des caractéristiques des ouvrages et des éléments d'interface pour modéliser l'interaction sol-structure ainsi que les conditions hydrauliques.
- La détermination de l'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

Grâce à ces éléments, la MEF permet :

- De réaliser des calculs d'écoulement.
- De simuler toutes les étapes des travaux.
- De prendre en compte les variations des caractéristiques des ouvrages et des couches de sol.

Les résultats obtenus portent sur :

- Pour les ouvrages : déplacements et sollicitations internes.
- Pour le sol : déplacements, déformations, contraintes totales et effectives, pressions interstitielles.

Cette approche rend également possible l'étude de l'impact de la réalisation d'un écran sur des ouvrages existants.

Les logiciels les plus couramment utilisés en Algérie sont :

1. **CESAR (LCPC)** : logiciel 2D/3D particulièrement utilisé pour l'étude des tunnels.
2. **PLAXIS** : logiciel 2D développé par l'équipe du Pr. Vermeer, spécifiquement dédié à la géotechnique. C'est ce logiciel qui sera utilisé pour notre étude. [19].

III.1.5 Présentation de Plaxis

De nombreux logiciels d'éléments finis permettent aujourd'hui l'analyse de projets géotechniques. Toutefois, l'ingénieur expérimenté sait que la transition du réel au modèle numérique repose sur des hypothèses difficiles à évaluer. Le jargon spécifique aux éléments finis peut également sembler rebutant. Idéalement, l'utilisateur souhaiterait éviter de gérer des tâches telles que la numérotation des nœuds ou les réglages pointus réservés aux experts en calcul numérique.

Il souhaite disposer d'un outil facile à utiliser sur son poste de travail habituel, lui permettant de mener rapidement des études paramétriques sur des problèmes complexes. L'objectif est de minimiser les longues saisies de données et les interprétations fastidieuses de fichiers de résultats. C'est dans cet esprit que Plaxis a été conçu. [36].

III.1.6 Le code éléments finis Plaxis

Développé par des spécialistes de la géotechnique numérique, Plaxis représente aujourd'hui l'un des meilleurs compromis entre rigueur scientifique et facilité d'utilisation pour l'analyse pseudo-statique en 2D.

- Sur le plan scientifique, Plaxis est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité avancée (modèle à cinq paramètres), intégrant la prise en compte des pressions interstitielles et des effets de consolidation. Il repose sur des méthodes de résolution robustes et des algorithmes éprouvés, tout en proposant des procédures de choix automatiques pour assister l'utilisateur.
- Sur le plan pratique, l'interface ergonomique, basée sur des menus arborescents, rend la prise en main intuitive. L'opérateur est libéré de tâches fastidieuses et n'a que rarement besoin de consulter les manuels, qui sont succincts et faciles d'accès.

Grâce à ses nombreuses options par défaut (conditions aux limites, pressions interstitielles, contraintes initiales), Plaxis permet de réaliser rapidement des simulations fiables, tout en offrant la possibilité de raffiner les calculs ultérieurement, avec les mêmes données. [37].

III.1.7 Options par défaut et solutions approchées

Le système d'options par défaut et de solutions approchées constitue l'un des principaux atouts de Plaxis pour la modélisation géotechnique. Il vise à faire gagner du temps à l'utilisateur, à limiter les choix complexes et à rendre le logiciel plus convivial. Ce système repose sur une navigation via un menu

arborescent, où chaque branche correspond à une tâche spécifique, garantissant ainsi à la fois clarté et souplesse d'utilisation.

Les options par défaut interviennent dès la phase de maillage :

L'utilisateur peut définir un maillage très détaillé si nécessaire, mais s'il ne spécifie que les grandes lignes, le logiciel génère automatiquement un maillage optimisé à partir d'un petit nombre de nœuds-clés, tout

en assurant un contrôle permanent à l'écran. Ce module de génération automatique est d'ailleurs en cours d'amélioration pour une efficacité accrue.

Concernant les conditions aux limites sur les déplacements :

- Si elles sont complexes, l'ingénieur doit les spécifier précisément face par face.
- Si elles sont standards (déplacement nul à la base et déplacement horizontal nul sur les côtés), elles peuvent être appliquées automatiquement à partir du menu, avec un contrôle visuel immédiat.

La prise en compte des contraintes initiales dues au poids des terres peut se faire de manière rigoureuse via l'activation du multiplicateur de chargement associé au poids propre.

Lorsque l'on dispose d'une estimation de l'état de contraintes initial (état KOK_OKO), celui-ci peut être directement spécifié. Un léger déséquilibre du massif peut alors être corrigé automatiquement grâce au menu, en neutralisant fictivement les déplacements, puis en réinitialisant la déformation pour considérer l'état de gravité comme nouvelle origine.

L'option KOK_OKO est particulièrement utile et réaliste dans le cas de sols hétérogènes à surface libre presque horizontale, comme pour des parois moulées dans des sols mous.

Plaxis accorde également une attention particulière aux pressions interstitielles :

- Pour un calcul précis, il est possible de modéliser les écoulements en milieu poreux, même si cela demande du temps de calcul.
- Si la nappe phréatique reste globalement horizontale, on peut adopter une pression hydrostatique approchée, rendant les calculs bien plus rapides grâce à la simple gestion des variations de poussée d'Archimède.

Le logiciel facilite aussi la gestion des calculs non linéaires :

- L'opérateur peut choisir manuellement les tailles de pas de chargement, le nombre d'étapes, la rigidité des interfaces, et la méthode de résolution.
- S'il le souhaite, Plaxis peut automatiquement proposer des paramètres optimisés, basés sur l'expérience accumulée en calcul numérique.

Pour les calculs de consolidation réalisés en différences finies explicites sur le temps, le pas de temps peut également être choisi automatiquement selon des critères numériques reconnus.

Enfin, un calcul par éléments finis génère une quantité importante de résultats :

- **Résultats pratiques** : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à différents stades de chargement.

- **Résultats mathématiques** : informations sur le processus de calcul.

L'accès à ces résultats est facilité par un menu arborescent, permettant à l'utilisateur de sélectionner les données pertinentes en fonction de ses besoins. [35].

III.2 Les modèles de comportement utilisés dans Plaxis

Plaxis propose une large gamme de modèles de comportement des sols, allant du modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb aux modèles avancés décrivant le comportement élasto-viscoplastique sous sollicitations monotones ou cycliques. Ces modèles ont été conçus pour s'intégrer dans des calculs par éléments finis, en tenant compte du comportement réel des sols.

Cependant, deux grandes difficultés ont limité leur adoption généralisée :

- Les lois de comportement complexes nécessitent des paramètres difficiles à déterminer, demandant des études spécifiques souvent incompatibles avec le cadre classique des projets d'ingénierie.
- L'intégration de ces lois sophistiquées dans des logiciels 2D ou 3D reste techniquement complexe et coûteuse.

Face à cela, la philosophie de développement de Plaxis est différente :

Son objectif est de fournir un outil à la fois robuste, simple et adapté aux projets géotechniques réels, avec des modèles dont les paramètres peuvent être facilement obtenus à partir d'études géotechniques standards.

Plaxis agit ainsi comme une "règle à calcul numérique" pour l'ingénieur.

Les modèles choisis, bien que parfois considérés comme simples, sont très efficaces lorsqu'ils sont appliqués correctement :

- **Pour un problème de soutènement** (paroi moulée, palplanche, etc.), le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb est suffisant.
- **Pour un remblai sur sol mou** soumis à un chargement progressif et nécessitant une prise en compte de la consolidation et de l'écrouissage, le modèle Soft Soil est plus adapté.
- **Pour un calcul d'écoulement** simple, un matériau élastique suffit ; pour coupler écoulement et déformation, un modèle élasto-plastique devient nécessaire.

Trois règles d'or pour la modélisation numérique :

- Identifier le comportement principal à modéliser.
- Choisir un modèle adapté à ce comportement.
- Interpréter les résultats en tenant compte des hypothèses et paramètres utilisés.

La modélisation numérique reste ainsi avant tout une traduction du problème réel sous une forme mathématique adaptée. [38].

III.2.1 Contraintes totales, contraintes effectives et pressions interstitielles

Le comportement mécanique des sols dépend principalement des propriétés du squelette solide. Il est donc indispensable d'utiliser les

- **contraintes effectives** pour définir les lois de comportement.

Les pressions interstitielles générées dans un sol proviennent du blocage des variations de volume, lié à la faible perméabilité. Ainsi :

- Un sable peut se comporter comme un matériau non drainé sous sollicitation rapide (par exemple en cas de séisme).
- Une argile reste généralement non drainée à court terme.

Lorsque les variations de volume sont empêchées, des pressions interstitielles apparaissent. En régime élastique, et sous l'hypothèse de grains de sol incompressibles, la relation suivante est établie :

$$\sigma_w = \frac{k_w}{n} \varepsilon_v$$

Où σ_w est la surpression interstitielle, n la porosité, K_w le module volumique de l'eau et ε_v est un incrément de déformation volumique.

Les calculs en contraintes totales restent possibles. Ils sont souvent utilisés pour estimer la stabilité à court terme ou les tassements après la construction. Cependant, ils négligent les effets des pressions interstitielles, qui jouent pourtant un rôle déterminant dans la stabilité de certains ouvrages.

Leur inconvénient majeur est d'ignorer les pressions interstitielles, quand on connaît leur rôle majeur sur la stabilité de remblai. [39].

III.2.2. Modèle élastique

Le modèle élastique linéaire employé dans Plaxis est un modèle classique. Lors de la saisie des données, il est nécessaire de fournir le module de cisaillement G ainsi que le coefficient de Poisson ν . L'intérêt du module G réside dans son indépendance vis-à-vis des conditions de drainage du matériau ($G = G' = G'' = G'''$), contrairement aux modules de Young, où le module non drainé est supérieur au module drainé. Il aurait semblé logique d'utiliser K comme second paramètre élastique, puisque G est déjà utilisé. Cependant, K_u est infini (ce qui correspond à $\nu = 0,5$)

$\nu = 0,5$ et son utilisation est moins courante. En pratique, G est directement mesuré lors des essais pressiométriques.

La relation entre le module d'Young E et les autres modules sont données par les équations :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} ; K = \frac{E}{3(1+\nu)} ; E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)}$$

Le modèle élastique linéaire de Plaxis est principalement utilisé pour modéliser les éléments de structure en béton ou en métal en interaction avec le sol. Il peut également s'avérer pertinent pour traiter certains problèmes de mécanique des roches.

Les paramètres de ce modèle sont représentés sur la figure (III.1): [28].

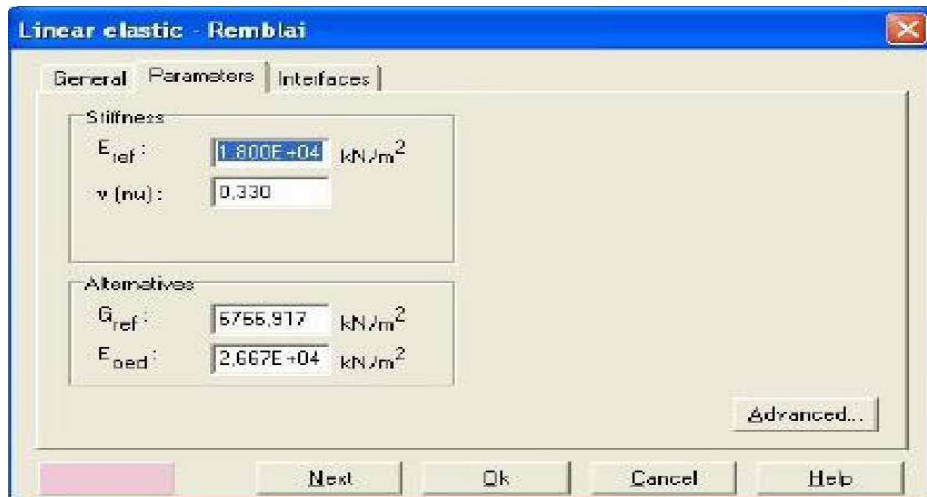


Figure. III.1 : Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire Et les paramètres avancés sur.

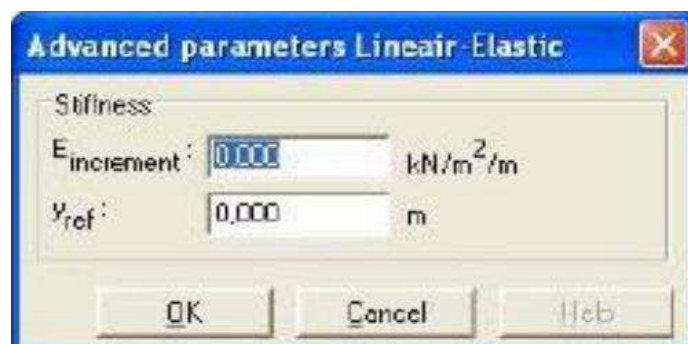


Figure. III.2 : Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique

Les paramètres avancés sont reliés par l'équation :

$$E_{oed} = E_{ref} + (y_{ref} - y)E_{incrément} \text{ avec } y_{ref} > y$$

E incrément : Augmentation de la rigidité [kN/m²/m]

y_{ref}: Unité de profondeur réf [m]

III.2.3. Modèle de Mohr-Coulomb

Le modèle de comportement de Mohr-Coulomb décrit un matériau à comportement élastique parfaitement plastique, sans phénomène d'écrouissage. Il est largement utilisé en géotechnique en raison de la pertinence des résultats qu'il permet d'obtenir lors des calculs.

Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan \phi + c$$

Où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et le cisaillement, Et c et ϕ Respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (Figure III.3).

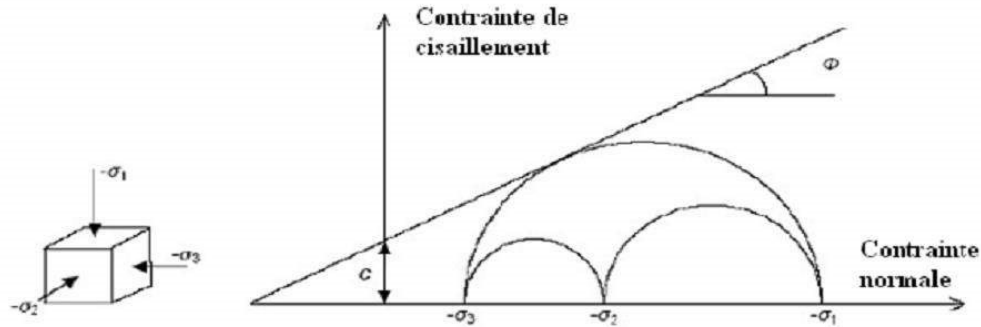


Figure. III.3 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb

En trois dimensions, le critère de Coulomb suppose que la contrainte intermédiaire n'a pas d'influence. Le critère se présente sous la forme d'une pyramide irrégulière, édifée autour de la trisectrice (voir figure III.4) à partir de l'hexagone irrégulier caractéristique du modèle de Mohr-Coulomb.

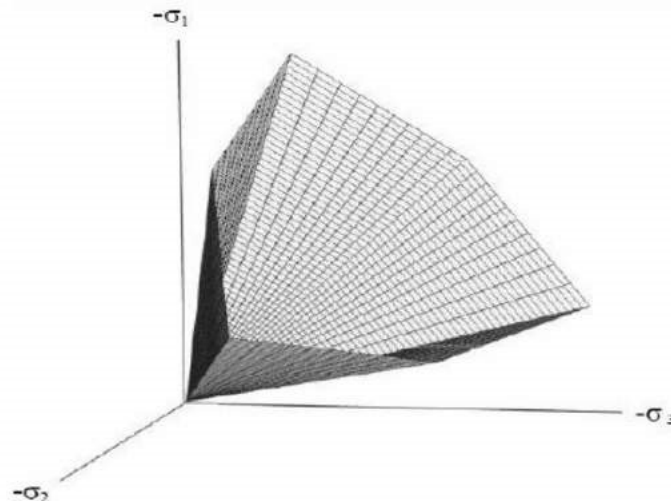


Figure III.4 : Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour $c=0$

Le modèle nécessite la détermination de cinq paramètres (voir figure III.5).

Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité). Les deux autres sont c et ϕ , respectivement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

Figure III.5 : Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb

a. Module d'Young

Le choix du module de déformation constitue l'un des défis majeurs en géotechnique. En effet, ce module varie en fonction de l'amplitude des déformations ainsi que de la contrainte moyenne appliquée. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module de déformation est supposé constant, ce qui peut sembler peu réaliste. Utiliser un module tangent à l'origine (correspondant au $G_{\max}$ obtenu lors d'essais dynamiques ou sous très faibles déformations) nécessiterait des essais spécifiques et coûteux.

Il est donc recommandé d'adopter un

Module moyen, par exemple celui correspondant à 50 % du déviateur de rupture (voir figure III.6).

L'utilisateur doit toujours garder à l'esprit l'importance de ce choix, une problématique qui se retrouve également dans les calculs classiques de fondations.

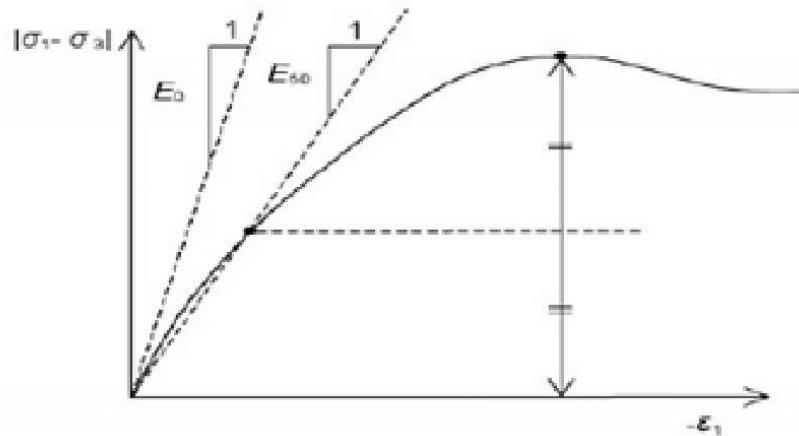


Figure. III.6 : Définition du module à 50 % de la rupture

Dans la boîte de dialogue des paramètres avancés, on peut aussi rentrer un gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

b. Coefficient de Poisson

Il est recommandé d'adopter une valeur du coefficient de Poisson comprise entre 0,2 et 0,4. Cette plage est adaptée à l'application du poids propre, que ce soit par la procédure KOK_0K0 ou par chargement gravitaire. Toutefois, pour certains cas particuliers, notamment en situation de décharge, des valeurs plus faibles peuvent être utilisées. Dans le cas des sols incompressibles, le coefficient de Poisson tend vers 0,5, bien que cette valeur théorique ne soit pas applicable en pratique.

c. Angle de frottement

Plaxis ne prend pas en compte la variation de l'angle de frottement en fonction de la contrainte moyenne.

L'angle de frottement à renseigner doit être soit l'angle de frottement au pic, soit l'angle de frottement au palier.

Il est important de noter que des angles supérieurs à 35° peuvent entraîner un allongement significatif des temps de calcul.

Il est donc judicieux de débiter les simulations avec des valeurs d'angle de frottement modérées, puis de les ajuster progressivement si nécessaire. L'angle de 35° reste cohérent avec les valeurs d'angle de frottement à volume constant (ϕ_{cv}). L'angle de frottement peut être estimé à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb (voir figure III.3).

d. Cohésion

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques. Pour les analyses en non drainé avec $\phi_u = 0$ Plaxis offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance

linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre c-depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans les problèmes (typiquement en kPa/m).

e. Angle de dilatance Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté ψ ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\psi = \phi - 30^\circ \text{ pour } \phi > 30^\circ$$

$$^\circ\psi = 0^\circ \text{ pour } \phi < 30^\circ$$

Le cas où $\psi < 0^\circ$ correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur $\psi = 0^\circ$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes.

f. Les contraintes de traction

La pyramide de Mohr-Coulomb autorise l'existence de contraintes de traction (voir figure IV.4). Toutefois, ces contraintes sont généralement peu réalistes pour les sols.

Il est donc possible de les éliminer (tension cut-off) ou de les réduire (tensile strength). Par ailleurs, pour prendre en compte les variations des propriétés avec la profondeur, l'utilisation des paramètres avancés est recommandée (voir figure III.7). [].

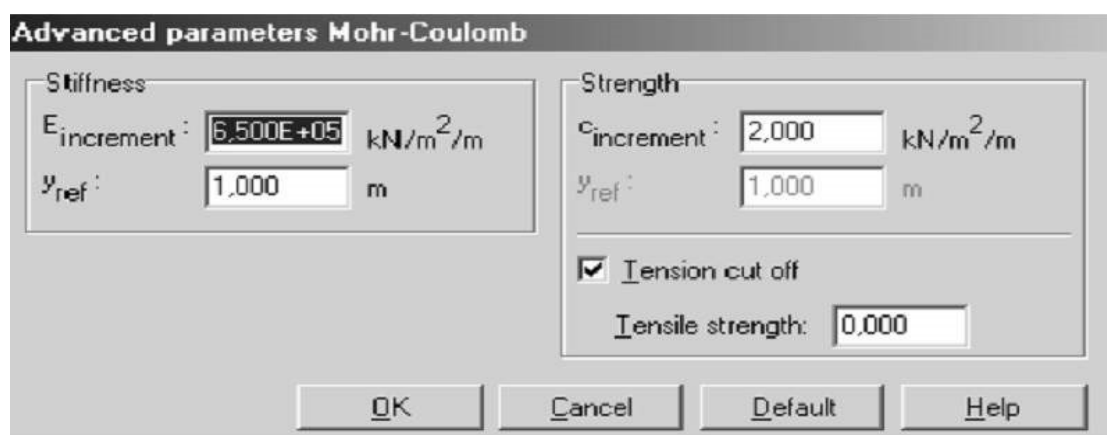


Figure. III.7 : Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb

CONCLUSION

Ce rapide aperçu des différents modèles utilisés dans Plaxis montre qu'il s'agit de modèles suffisamment simples pour permettre la détermination de leurs paramètres à partir d'une étude géotechnique classique ou par le biais de corrélations.

Ces modèles ne comportent aucun paramètre de calage ou sans signification physique, contrairement aux modèles plus sophistiqués, souvent rencontrés dans le domaine de la recherche, où la détermination des paramètres nécessite des techniques

D'optimisation complexes.

L'utilisateur doit faire face à deux choix essentiels : l'un lié aux principes géotechniques classiques, l'autre à la simulation numérique.

La sélection des paramètres géotechniques à entrer dans Plaxis ne diffère pas fondamentalement de celle réalisée pour un calcul manuel de tassement ou de stabilité : à partir des résultats d'essais, il est nécessaire de définir ce que l'on pourrait appeler un modèle géotechnique de terrain.

Certains paramètres peuvent différer dans leur formulation, mais ils restent toujours reliés aux caractéristiques géotechniques classiques. Parmi ceux-ci, l'angle de dilatance est probablement le paramètre le moins usuel.

CHAPITER 04 :
MODELISATION
NUMERIQUE PAR LE CODE
PLAXIS

CHAPITER 04 : MODELISATION NUMERIQUE PAR LE CODE PLAXIS

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse numérique bidimensionnelle d'un corps de chaussée dans l'autoroute est ouest Le but de cette analyse est de déterminer la déformation de la chaussée,

Les données introduites dans cette étude sont retirées à partir du rapport géotechnique ;

La modélisation numérique de remblai routier a été réalisé à l'aide du code d'éléments finis (PLAXIS 2D)

IV.2. Lieu de l'étude

Cette étude a été menée sur le tronçon de l'autoroute Est-Ouest, de Tlemcen vers Sidi Belabes, désigné la section W7 (PK 64+700) de la partie autoroute Tlemcen,

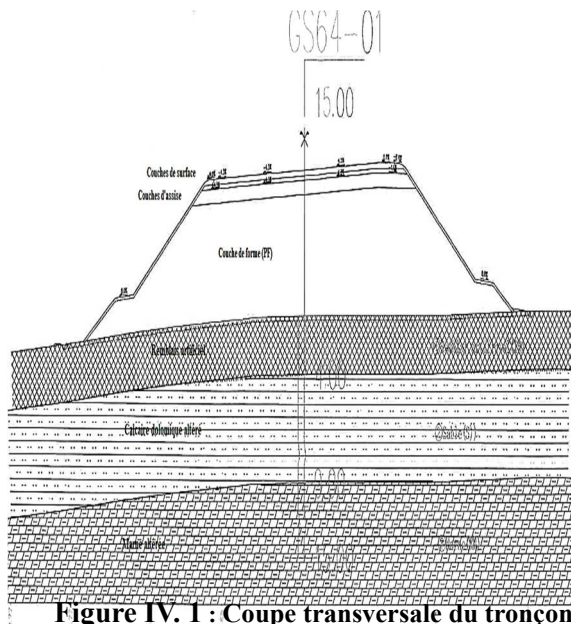


Figure IV. 1 : Coupe transversale du tronçon Autoroute

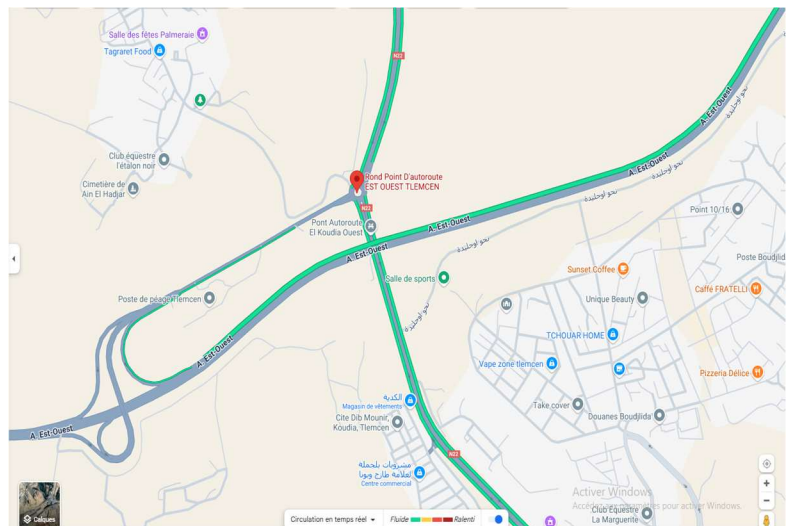


figure IV.2 :localisation d'une site Google Maps
(pk64+700au pk 65+070)

IV.3. Topographie et géomorphologies

Cette zone est constituée de deux (2) morphologies différentes:

- Le relief du PK61 +760 au PK62+633 est une zone des collines basses où le terrain est peu accidenté. La plus haute altitude est de 606 m, la plus basse altitude est de 581 m. La différence moyenne est de 25 m. La pente varie de 5-10° environ, la couverture végétale est abondante avec apparition de dolomie et de calcaire dolomitique.
- Le relief du PK62+633 au PK66+240 est une zone de chaîne de collines où le terrain est

assez accidentée avec des escarpements très profonds. La plus haute altitude est de 575 m, la plus basse altitude est de 487 m. La différence moyenne est de 88 m. La partie superficielle est une terre végétale. La partie inférieure est constituée de marne et de grès.

IV. 4. Données géotechniques et mécaniques des différentes couches :

Les caractéristiques géotechniques des différentes couches est mentionné dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV. 1 : caractéristique géotechnique des sols

Caractéristiques	Marne altérée	Calcaire dolomique	Remblai artificielle	Couche de forme (PF)
Conditions hydraulique	Non drainé	Drainé	Non drainé	Drainé
Poids volumique γ (kN/m ³)	18	21	19.7	18.5
Poids volumique saturé γ_{sat} (kN/m ³)	23			
Cohésion drainé C' (kPa)	190	2.8	22	15
Angle de frottement ϕ' (°)	28	34	33	27
l'angle de dilatance ψ	0	4	3	0
Perméabilité horizontale k_h (m/j)	0.01	0.5	0.1	0.5
Perméabilité verticale k_v (m/j)	0.01	0.5	0.1	0.5
Module de Young E (kN/m ²)	10000	50000	20000	20000
Coefficient de Poisson ν	0.3	0.3	0.3	0.3

IV.5. Les charges réparties :

IV. 5.1. Charge des véhicules

Le trafic est un élément essentiel du dimensionnement de la chaussée, essentiellement en termes de densité et poids. Le poids des véhicules est transmis au sol par l'intermédiaire des pneumatiques sous la forme de pression :

- véhicule léger : $P = 0.22 \text{ MPa}$
- Poids lourd : $P = 0.66 \text{ MPa}$
- $1 \text{ Mpa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2 = 10 \text{ bar}$

La charge la plus significatif qui influence le corps de chaussée est la charge des véhicules du poids lourd.

IV.5.2. Structures de chaussée de l'autoroute

Épaisseur totale de la structure de chaussée comprend les couches d'assise et les couches de surface, présentée dans le tableau ci-dessous:

Tableau IV. 2: Evaluation du chargement réparties

Structure de la chaussée et charge véhicule	Masse Volumique Réel (kN/m ³)	Epaisseur (cm)	Pression (kN/m ²)
Couche de roulement : 3.5cm BBMA 3 0/10	24.5	3.5	0.857
Couche de liaison : 5cm BBME 1 0/10	24.5	5	1.225
Couche de base : 11cm EME 2 0/14	24.5	2	0.49
Couche de fondation : 20cm GNT(type B) 0/31.5	26	20	5.2
La somme de la pression des couches appliquées sur la PF			7.772 $\approx$ 8
La pression des véhicules « poids lourd » transmis au sol			660

La somme	668
----------	-----

BBMa béton bitumineux mince de classe a

BBME béton bitumineux à module élevé

EMEI enrobé à module élevé de classe i

GNT (BiCj) grave non traitée (de type Bi et de classe mécanique Cj)

IV. 6. Modélisation du projet :

IV. 6.1. Entrer des données :

IV. 6.1.1. Paramètres généraux

La fenêtre des réglages généraux (*General settings*) apparaît lors de la création d'un nouveau projet et peut ensuite être ouverte depuis le menu *File*. Cette fenêtre contient les onglets de projet (*Project*) et de dimensions (*Dimension*). L'onglet *Project* contient le nom du projet, une description, le type de projet et les données d'accélération. L'onglet *Dimensions* contient les unités fondamentales de longueur, de force et de temps et les dimensions de la table à dessin voir figure 1.

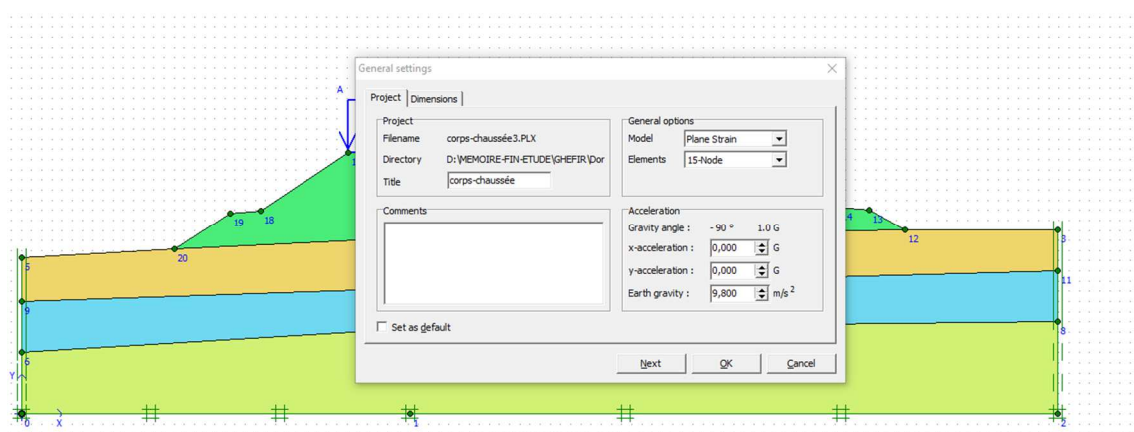


Figure IV. 3: Générale setting

IV. 6.1.2. Modèle géométrique

La géométrie complète peut être dessinée à l'aide de l'option « Ligne géométrique ». Dans ce modèle, le niveau du sol avant la construction du remblai constitue le niveau de référence dans la direction verticale ($y = 0, x = 0$), le modèle a une largeur de $x = 101.89$ m et hauteur maximale $y = 26.96$ m (Figure 2).

Les fixités standard peuvent être utilisées pour définir les conditions aux limites. Le modèle géométrique est illustré à la Figure 2.

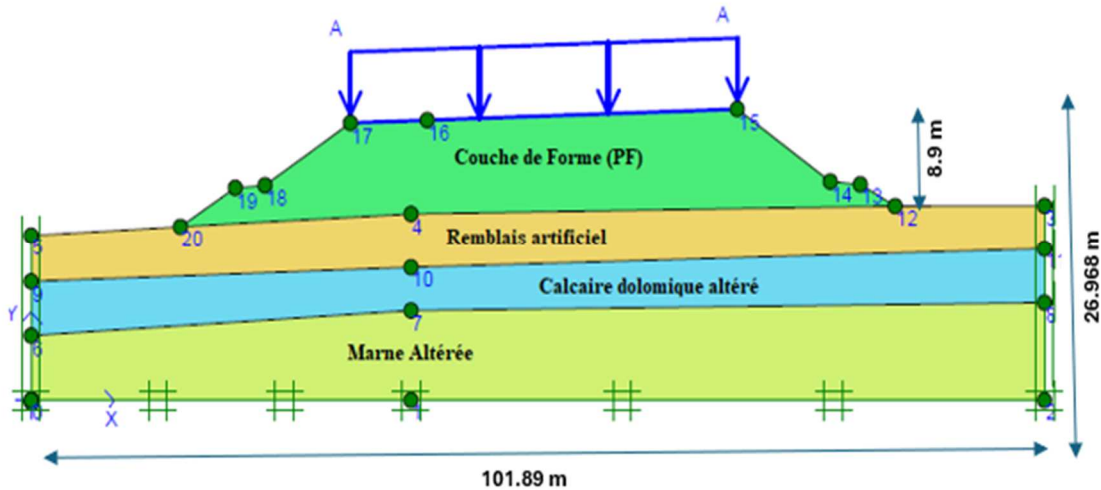


Figure IV. 4 : Géométrie avec les différentes couches de sols

IV. 6.1.3. Matériaux et génération de maillage

Les propriétés des différents types de sol sont présentées dans le tableau 4.1. L'argile et la tourbe sont non drainées. Ce type de comportement entraîne une augmentation des pressions interstitielles lors de la construction du remblai. Affectez les données aux clusters correspondants dans le modèle géométrique. Après la saisie des paramètres de matériaux, un maillage éléments finis simple peut être généré. Les paramètres de maillage par défaut seront utilisés dans ce tutoriel.

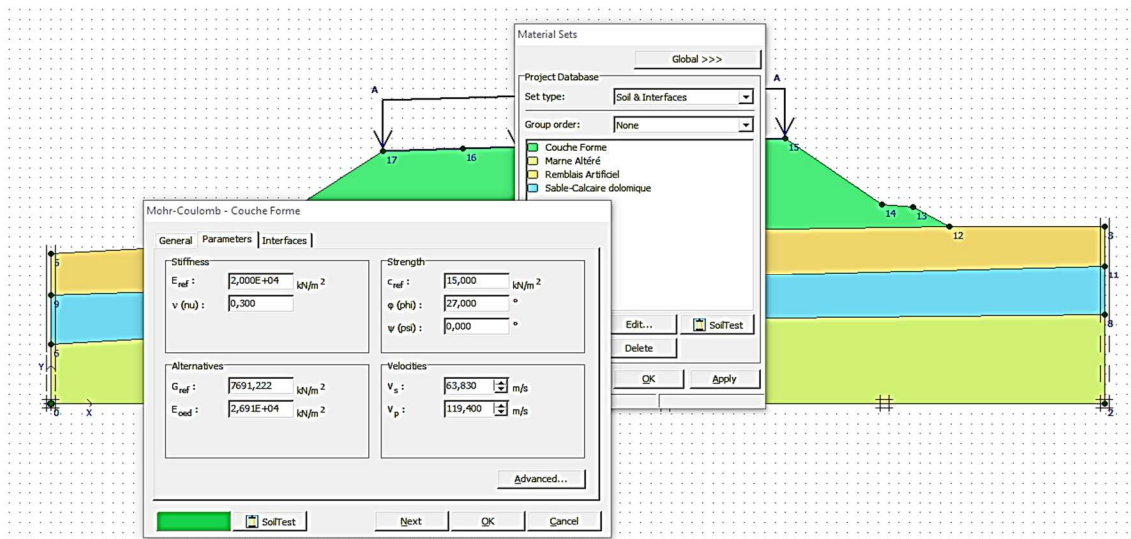


Figure IV. 5 : Détermination et affectation des données des différentes couches

PLAXIS propose différents modèles qui permettent de simuler le comportement d'un sol. Le modèle de comportement adopté pour le sol est le « *Modèle de Mohr-Coulomb* ». Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Ce modèle comporte cinq paramètres : le module d'Young, E , le coefficient de Poisson, ν , la cohésion, c , l'angle de frottement, ϕ , et l'angle de dilatance ψ .

IV. 6.1.4. Maillage :

Lorsqu'un modèle géométrique est entièrement défini et que les propriétés des matériaux sont assignées à toutes les couches et à tous les éléments de structure, la géométrie doit être divisée en éléments finis afin de réaliser le calcul par éléments finis. Le maillage à une densité moyen avec des éléments triangulaires de 15 nœuds, présenté dans la figure IV.(4 & 5.)

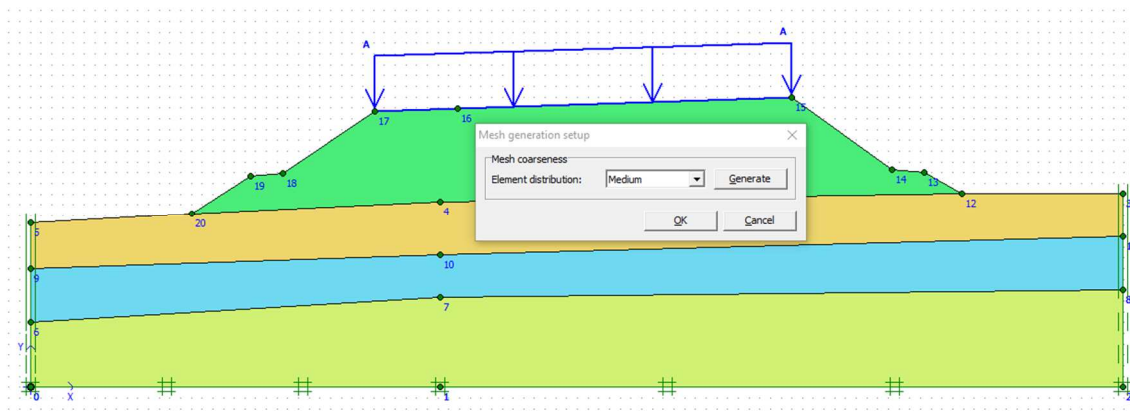


Figure IV. 6 : Choix de la densité du maillage

La génération du maillage est lancée en cliquant sur le bouton de génération du maillage situé dans la barre d'outils ou en sélectionnant l'option *Generate* depuis le menu *Mesh*. La génération est aussi activée directement après la sélection d'une option d'affinage dans le menu *Mesh*.

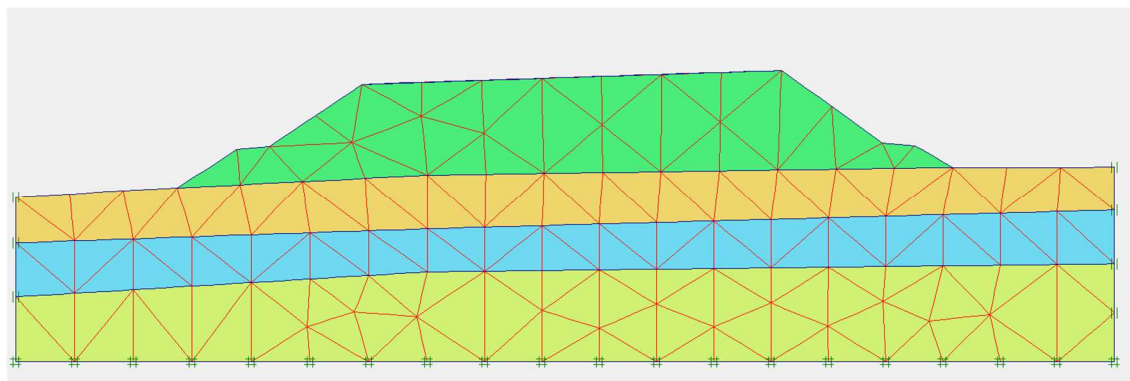


Figure IV. 7 : Modèle avec maillage de densité moyen

IV. 6.1.5. Détermination du chargement :

Les valeurs des charges réparties sont spécifiées en force par surface (par exemple kN/m^2). Les charges réparties peuvent avoir des composantes x et/ou y .

La valeur d'un chargement peut être modifiée en cliquant sur la ligne géométrique correspondante et en sélectionnant le système de chargement correspondant. La fenêtre de propriétés des charges réparties (*Distributed loads*) s'ouvre alors. Il est possible d'y spécifier les deux composantes du chargement pour chaque extrémité de la ligne du modèle géométrique. La distribution est toujours linéaire le long de la ligne

voir figure 6. Dans notre étude les charge inclus la charge des couches d'assise et de surface en plus de la charge des véhicules poids lourds.

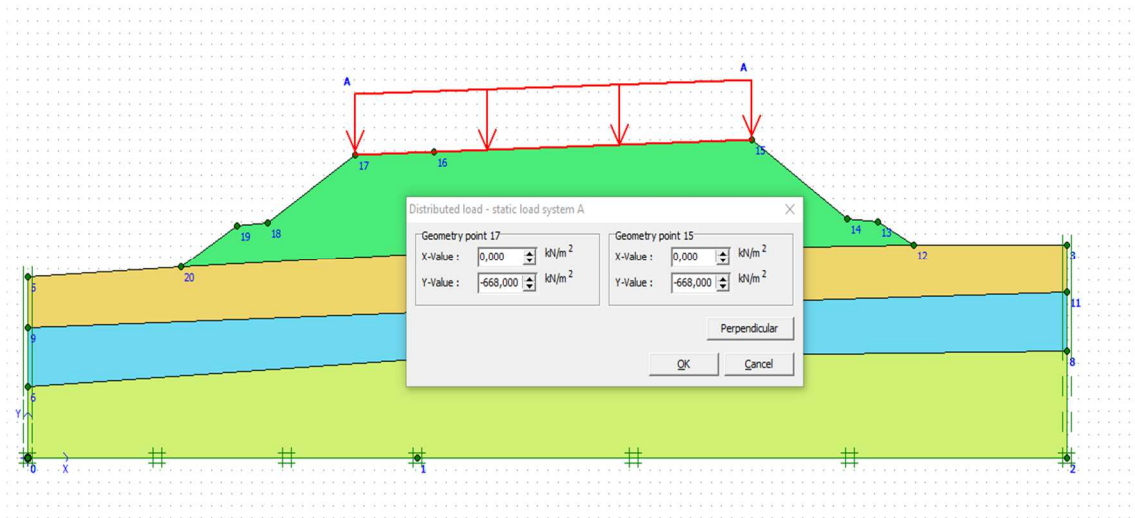


Figure IV. 8: Affection des charges réparties

IV. 6.2. CALCULS

IV. 6.2.1. Conditions initiales :

Une fois le modèle géométrique créé et le maillage d'éléments finis généré, l'état de contraintes initiales et la configuration initiale doivent être spécifiés. Cela se fait dans la partie traitant des conditions initiales du programme d'entrée des données. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (mode des conditions hydrauliques) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique).

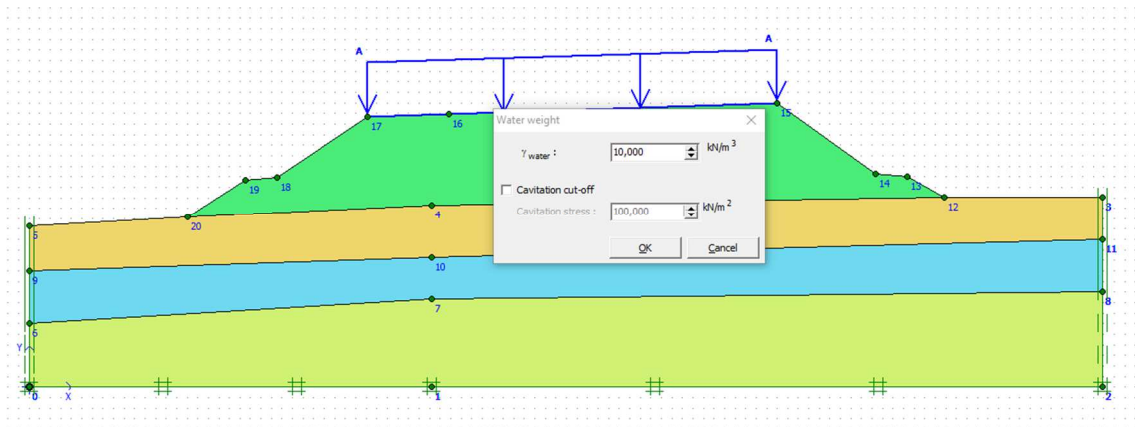


Figure IV. 9 : Affection poids volumique pour l'eau

Dans des projets qui incluent des pressions interstitielles, la saisie d'un poids volumique pour l'eau est nécessaire pour faire la distinction entre les contraintes effectives et les pressions interstitielles. Lorsque l'utilisateur entre pour la première fois dans le mode des conditions hydrauliques d'un projet, une fenêtre apparaît dans laquelle le poids volumique de l'eau peut être modifié. Ce poids volumique peut aussi être saisi en sélectionnant l'option *Water weight* depuis le menu *Geometry*. Par défaut, le poids volumique de l'eau vaut 9,8 kN/m³

Conditions initiales Dans la situation initiale, le couche de forme est absent. Afin de générer les contraintes initiales, il faut donc d'abord le désactiver en mode de construction par étapes.

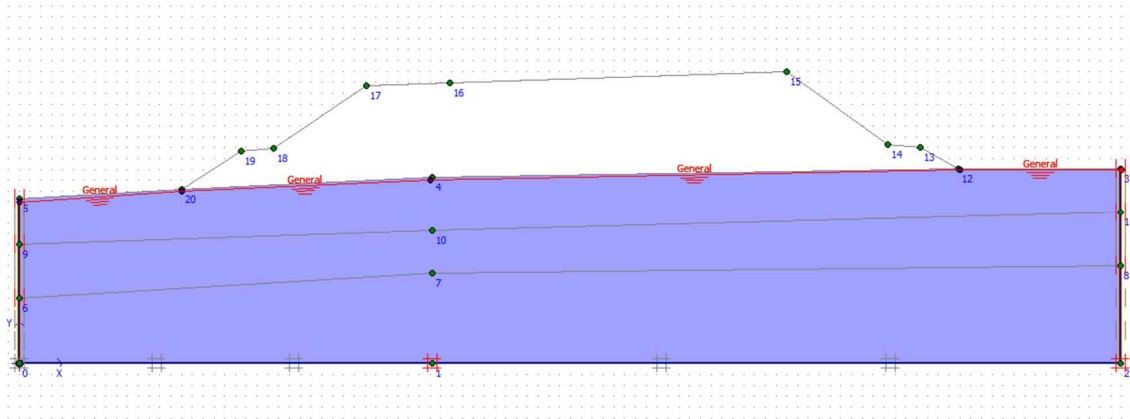


Figure IV. 10 : Conditions initiales

Les surpressions interstitielles apparaissent à cause du chargement de couches dont le matériau a été défini comme non drainé (*Undrained*).

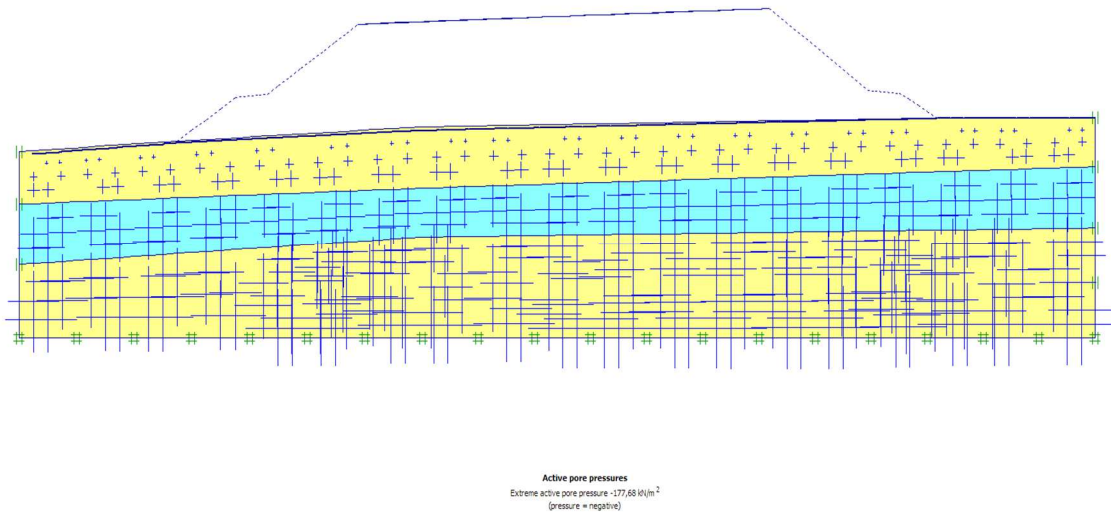


Figure IV. 11 : Les Pressions interstitielles

Les contraintes initiales dans un sol sont influencées par le poids du matériau et par l'histoire de sa formation. Cet état de contraintes est caractérisé généralement par une contrainte effective verticale initiale $\sigma_{v,0}$. La contrainte effective horizontale initiale $\sigma_{h,0}$ est liée à la contrainte effective verticale initiale par le coefficient de pression des terres au repos K_0 . ($\sigma_{h,0} = K_0 \sigma_{v,0}$) .

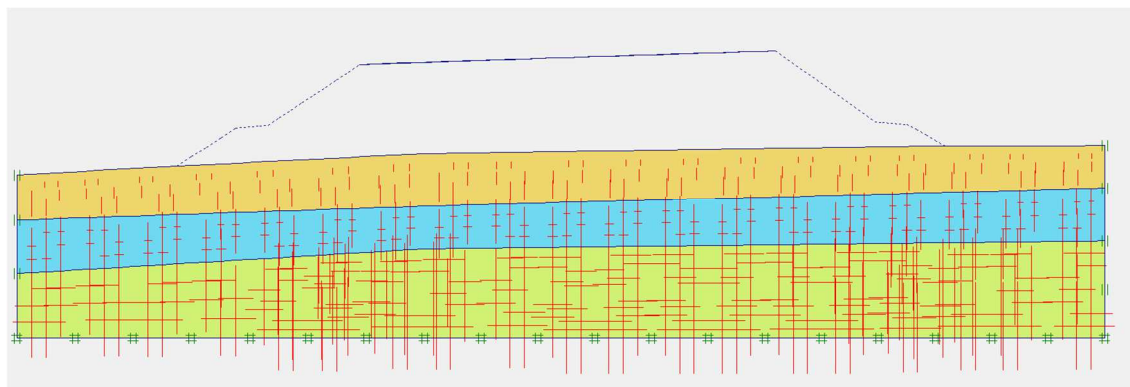


Figure IV.12 : Contraintes initiales

IV. 6.2.3. Phases de calcul :

Lorsqu'une nouvelle phase de calcul est introduite, celle-ci doit être définie. Les onglets *General*, *Parameters* et *Multipliers* dans la partie supérieure de la fenêtre principale, sont prévus à cet effet. En appuyant sur les touches *Enter* ou *Tab* du clavier après l'entrée de chaque paramètre, l'utilisateur est guidé vers chacun des autres paramètres. La plupart d'entre eux ont une valeur par défaut, ce qui simplifie l'entrée des données. En général, seuls quelques paramètres doivent être définis pour une phase de calcul. On trouvera plus de détails sur les différents paramètres dans les sections qui suivent.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	0
✓ <Phase 1>	1	0	Consolidation analysis	Staged construction	20,0...	1	1
✓ <Phase 2>	2	1	Consolidation analysis	Staged construction	200,...	1	11
✓ <Phase 3>	3	2	Consolidation analysis	Minimum pore pressure	27,0...	1	28
✓ <Phase 4>	4	1	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	1	29
✓ <Phase 5>	5	3	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	1	129

Figure IV.12 : Phases et type de calcul

Le type de calcul d'une phase (*Calculation type*) est d'abord défini dans le menu déroulant en haut à droite de l'onglet *General*. Il y a trois types de types de calcul fondamentaux distincts : un calcul plastique

(*Plastic*), une analyse de consolidation (*Consolidation*) et un calcul de coefficient de sécurité (*Phi-c reduction*). Dans notre projet on a adopté l'analyse de consolidation et le calcul du coefficient de sécurité.

IV.6.2.4. Connectivities

Les points désignés pour le calcul du coefficient de sécurité sont les point « A » et « B » au pied de la couche de forme (plateforme), avec le point « c » pour l'évaluation des pressions interstitielles sous la couche de forme.

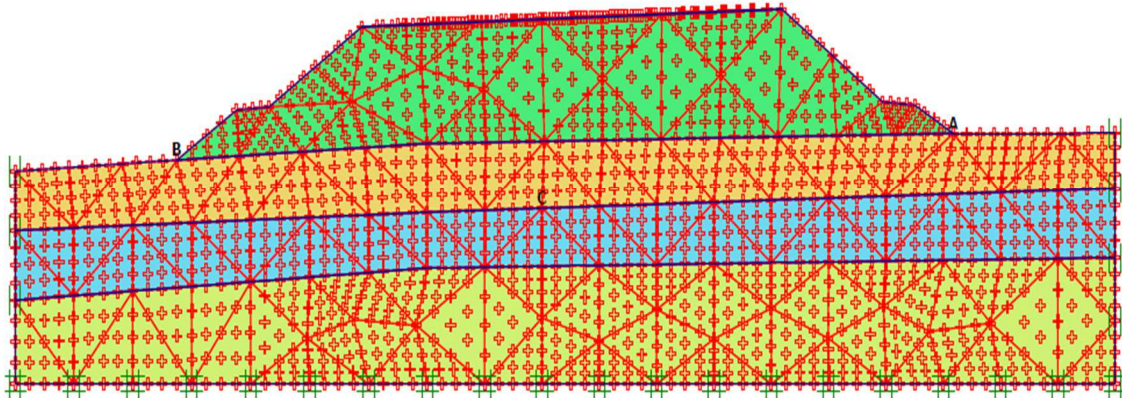


Figure IV.14 : Points de mesure

IV.7 : Résultats et Discussion

IV.7.1 : Excess pore pressures

Extreme excess pore pressure $-63,90 \cdot 10^{-6} \text{ kN/m}^2$

(pressure = negative)

Les eaux de surface s'infiltrent dans le sol a travers des fissures. La partie inferieure est constituee de marne, de dolomie qui retiennent difficilement les eaux. Les dolomies fissurees absorbent facilement les eaux.

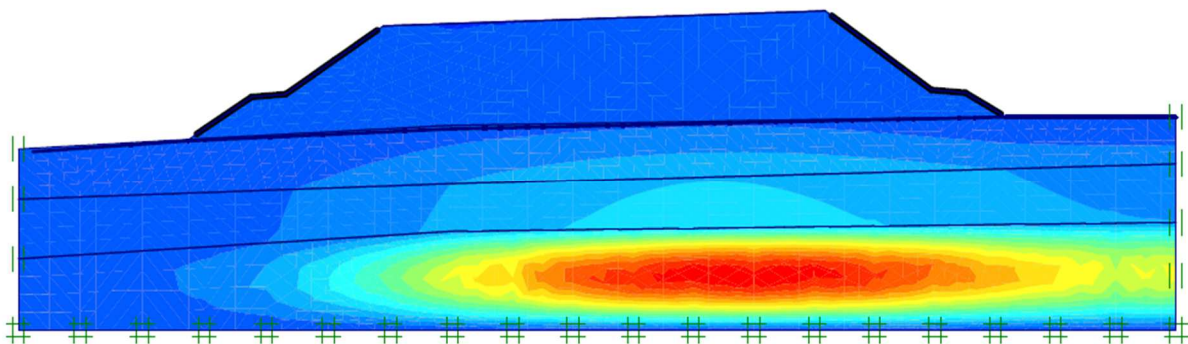


Figure IV.15. Excess pore pressures

Cette courbe illustre l'évolution de la pression interstitielle active (souvent synonyme de surpression interstitielle, Δu) au "Point C" sous le corps d'une chaussée routière, au fil du temps.

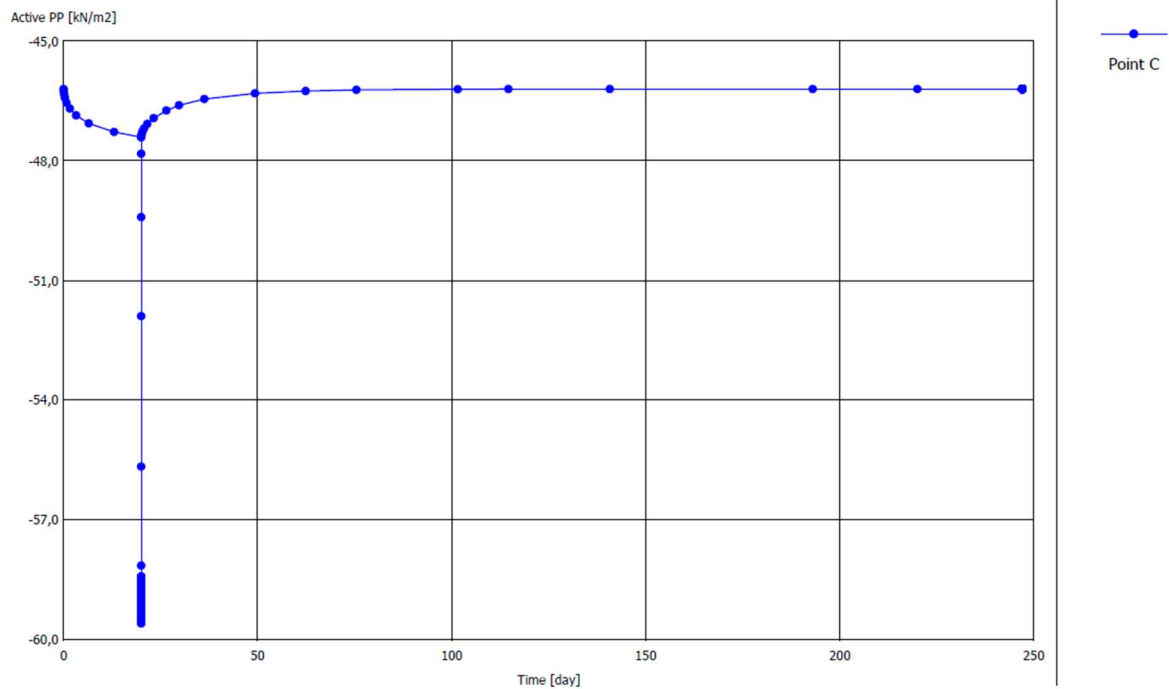


Figure. IV.16. Développement de la surpression interstitielle sous le remblai.

La courbe de développement de la surpression interstitielle est constituée de trois phases :

1. Phase Initiale / Mise en Charge (0 à environ 20 jours) : Génération de la Surpression Interstitielle

- Au début (jour 0), la pression interstitielle active est d'environ -46,0 kN/m².
- Très rapidement (dans les premiers jours), on observe une augmentation significative de la valeur absolue de cette pression (elle devient plus négative), atteignant une valeur minimale (pic de surpression) d'environ -58,5 kN/m² autour du 20ème jour.
- Cette augmentation de la surpression interstitielle (environ 12,5 kN/m² par rapport à la valeur initiale la plus proche du début du chargement) est typique de la mise en charge rapide du sol par la construction du remblai de la chaussée.
- Si le sol sous-jacent est fin et saturé (argileux, limoneux), il se comporte de manière non drainée à court terme. L'augmentation de la contrainte totale due au remblai est alors initialement reprise par l'eau interstitielle, provoquant cette surpression.

2. Phase de Dissipation Primaire (environ 20 jours à 75-100 jours) : Consolidation Primaire

- Après avoir atteint son pic, la surpression interstitielle commence à diminuer : la valeur devient moins négative, remontant rapidement au début, puis plus lentement. Par exemple, elle passe de -58,5 kN/m² à environ -47,0 kN/m² vers le 75ème jour.
- Ceci correspond à la phase de consolidation primaire. L'eau excédentaire s'évacue progressivement des pores du sol sous l'effet du gradient hydraulique créé par la surpression.

Pendant cette phase, la charge est transférée de l'eau interstitielle au squelette solide du sol. Cela entraîne une augmentation des contraintes effectives et, par conséquent, des tassements du sol sous le remblai. La majorité des tassements dus à la consolidation primaire se produit durant cette période.

3. Phase de Stabilisation / Fin de Consolidation (après 75-100 jours)

- Au-delà de 75-100 jours, la courbe montre que la dissipation de la surpression interstitielle ralentit considérablement et tend vers une valeur asymptotique.
- La pression interstitielle active se stabilise autour de $-46,5 \text{ kN/m}^2$ à $-47,0 \text{ kN/m}^2$ à long terme (observé jusqu'à 250 jours).
- Cela indique que la majeure partie de la consolidation primaire est achevée. Le sol a atteint un nouvel état d'équilibre hydraulique sous la charge permanente du remblai.
- Des tassements résiduels très lents, appelés tassements secondaires (ou fluage), peuvent encore se produire, mais ils ne sont pas directement liés à la dissipation de la surpression interstitielle.

IV .7.2: Deformed mesh

Extreme total displacement 25,91 m

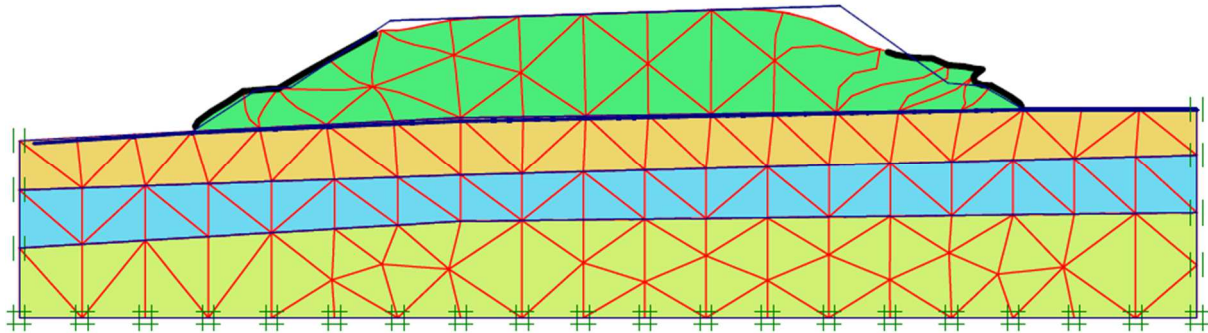


Figure IV.17: Déformation du maillage.

IV 7.3 :Total displacements (Utot)

Extreme Utot 25,91 m

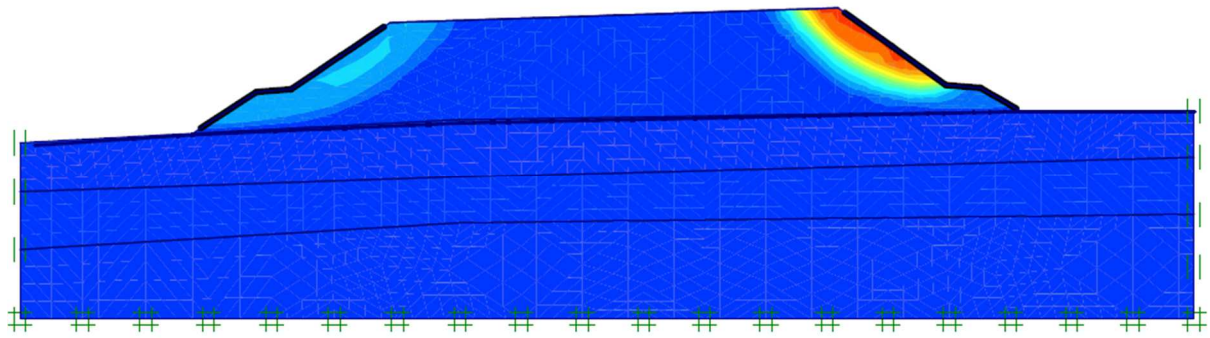


Figure IV.18: Les zones de déplacement total.

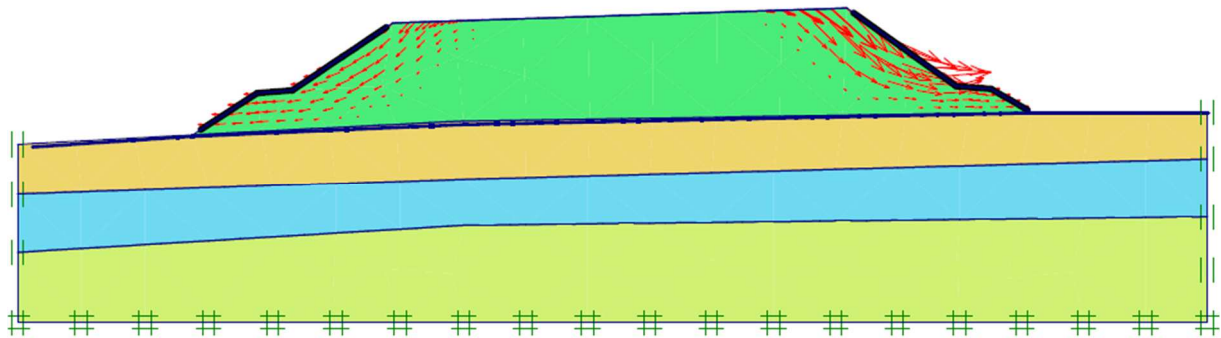


Figure IV.19 Les zones de déplacement total..

IV 7.4 :Vertical displacements (Uy)

Extreme Uy -18,65 m

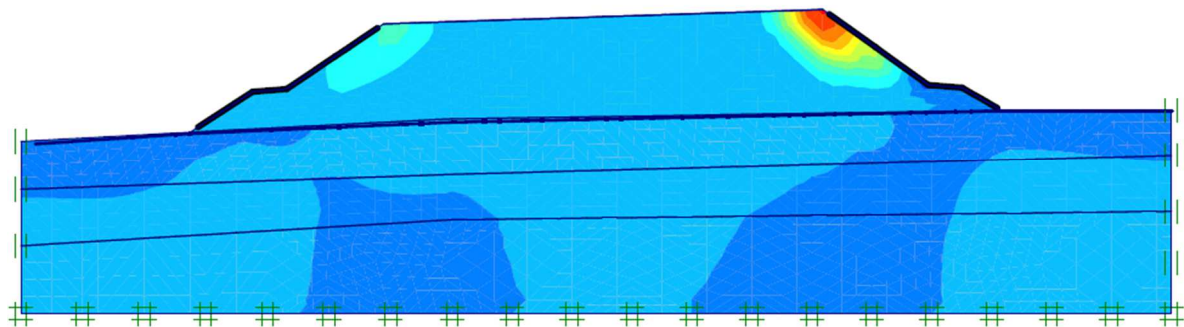


Figure IV.20. : déplacement verticale .

IV 7.5 :Horizontal displacements (Ux)

Extreme Ux 24,19 m

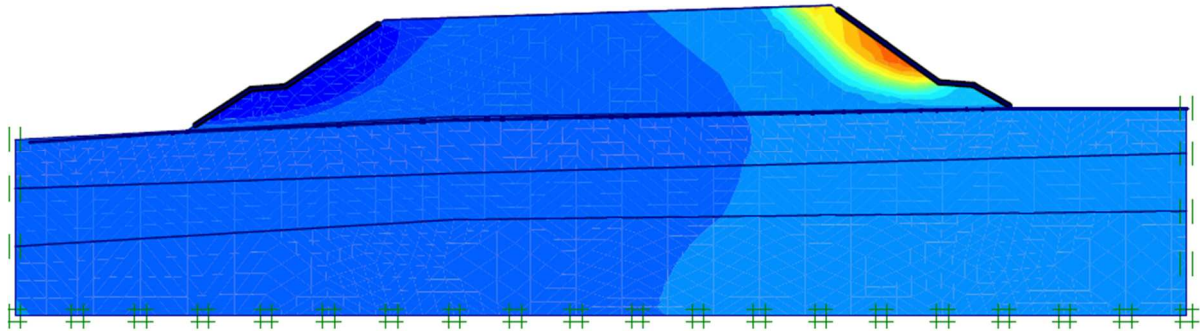


Figure. IV.21 déplacement horizontal.

IV.8: RÉDUCTION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES (PHI-C-REDUCTION)

Le coefficient total MSf permet de définir la valeur des caractéristiques du sol à une étape donnée de l'analyse:

$$\sum MSf = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}}$$

Où les caractéristiques notées 'donnée' se réfèrent aux propriétés saisies dans les propriétés des matériaux et les caractéristiques notées 'réduit' se reportent aux valeurs réduites utilisées au cours de l'analyse.

Contrairement aux autres coefficients, $\sum MSf$ vaut 1,0 au début d'un calcul pour utiliser les valeurs non réduites des caractéristiques des matériaux.

Cette courbe est typique d'une **analyse de sécurité par la méthode de réduction des paramètres de résistance (phi-c reduction)** réalisée avec Plaxis. Elle permet d'évaluer le facteur de sécurité (FoS) d'un ouvrage géotechnique, ici la couche de forme d'une chaussée routière, pour une phase de construction donnée (probablement au point A).

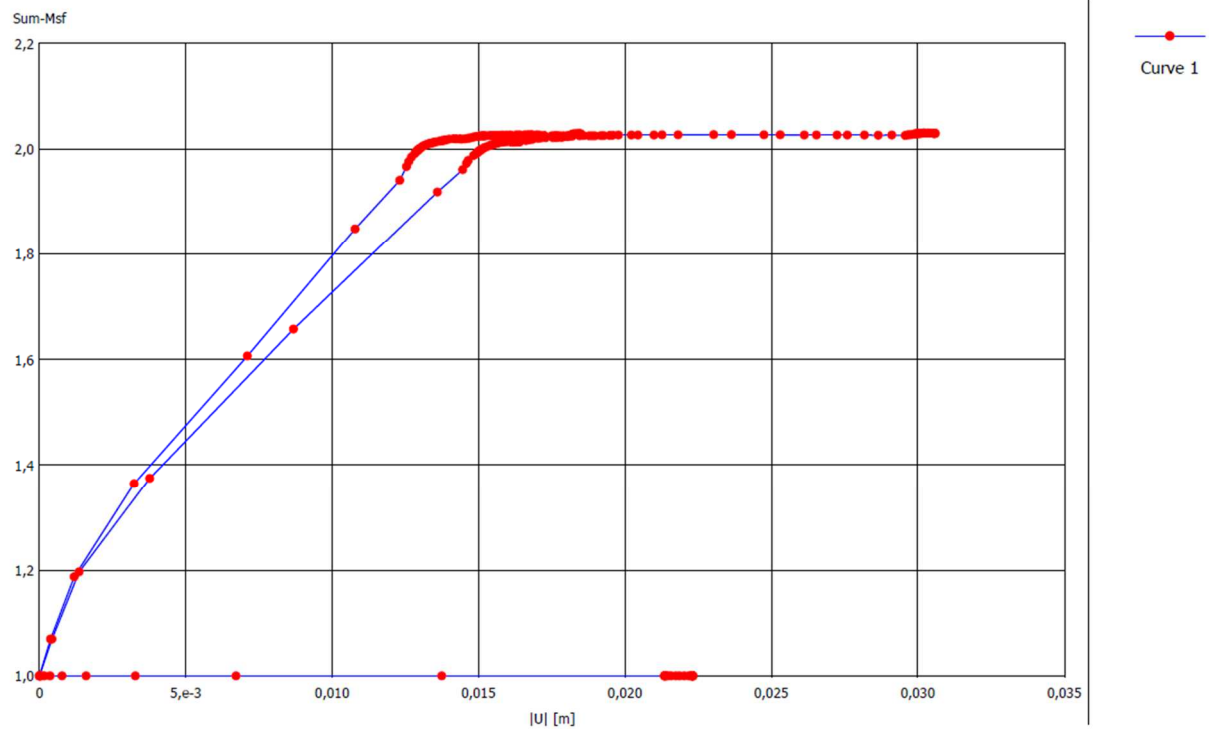


Figure IV.22: Évaluation du facteur de sécurité pour le processus de construction (point A).

Dans la coté gauche point « A », les résultats de l'inclinomètre indique des déplacement au niveau des deux (2 m) premier mètres en 2019, ensuite elle enregistre des déplacements dans les couches inférieure entre 5.50 m et 8.50 m.

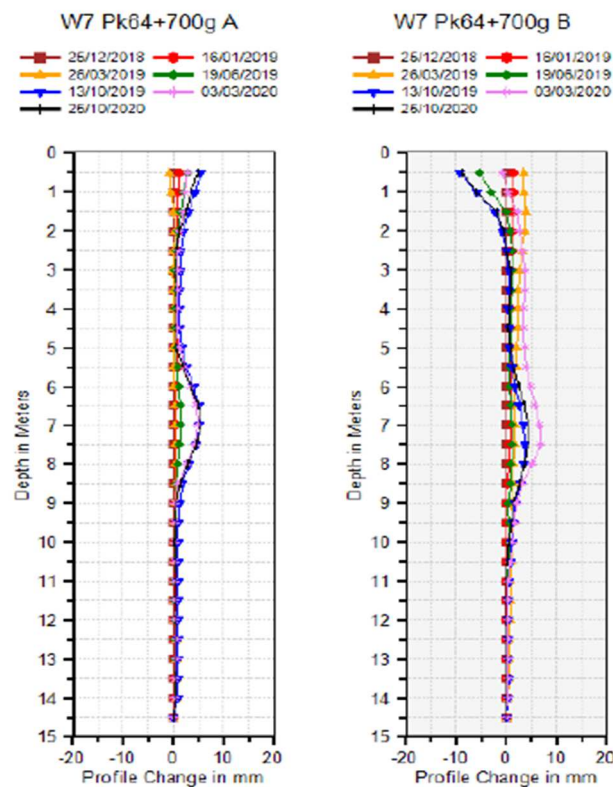


Figure. IV.23 résultats inclinométrique.

Dans l'axe des ordonnées (Y) : Sum-Msf (ΣMsf). C'est la somme des multiplicateurs appliqués aux paramètres de résistance du sol (cohésion 'c' et tangente de l'angle de frottement 'tan ϕ '). ΣMsf commence à 1.0 (état initial, pas de réduction de résistance) et augmente progressivement pendant l'analyse. La valeur de ΣMsf à laquelle le calcul n'arrive plus à converger (ou montre des déformations excessives) est le **Facteur de Sécurité (FoS)**.

Pour l'axe des abscisses (X) : |U| [m]. C'est la magnitude du déplacement nodal (déplacement total) en mètres. Il représente le déplacement d'un point particulier du modèle (potentiellement le "point A" que vous mentionnez, ou le point subissant le déplacement maximal) à mesure que la résistance du sol est réduite.

1. On peut remarquer dans la courbe ce qui suit :

- **Début de la courbe (Sum-Msf = 1.0, |U| $\approx$ 0 m) :** Le calcul commence avec les paramètres de résistance initiaux du sol. Le déplacement |U| est très faible et correspond au déplacement élastique ou elasto-plastique initial sous les charges de la phase de construction analysée.
- **Phase de chargement stable (Sum-Msf de 1.0 à environ 2.0) :** À mesure que ΣMsf augmente (c'est-à-dire que la résistance du sol est artificiellement réduite), les déplacements |U| augmentent de manière progressive et contrôlée. La pente de la courbe est relativement raide, indiquant que le système est encore stable. On voit une augmentation de |U| d'environ 0 m à approximativement 0.015 m (1.5 cm) lorsque Sum-Msf atteint environ 2.0.
- **Point d'inflexion / Début de plastification généralisée (autour de Sum-Msf $\approx$ 2.0) :** La courbe commence à s'infléchir de manière significative. Cela signifie que pour de petites augmentations supplémentaires de ΣMsf (petites réductions de résistance), les déplacements augmentent beaucoup plus rapidement. Le sol entre dans un état de plastification plus étendu, et un mécanisme de rupture commence à se former.
- **Plateau / Rupture (Sum-Msf > 2.0, se stabilisant autour de 2.03 - 2.04) :** La courbe devient presque horizontale. Cela indique que le système a atteint sa capacité portante limite. Toute tentative de réduire davantage la résistance du sol (augmenter ΣMsf) entraînerait des déplacements très importants, voire infinis (instabilité numérique). C'est le critère de rupture.
- **Facteur de Sécurité (FoS) :** La valeur de Sum-Msf sur ce plateau est le facteur de sécurité calculé. D'après la courbe rouge, le **FoS est d'environ 2,03 à 2,04**.

La courbe pour le point « B » représente l'évaluation du facteur de sécurité (FoS) par la méthode de réduction des paramètres de résistance (souvent appelée "phi-c reduction" ou "strength reduction method") pour un état spécifique du processus de construction, désigné ici comme "point B", concernant la couche de forme d'une chaussée routière. L'analyse est effectuée avec Plaxis 8.6.

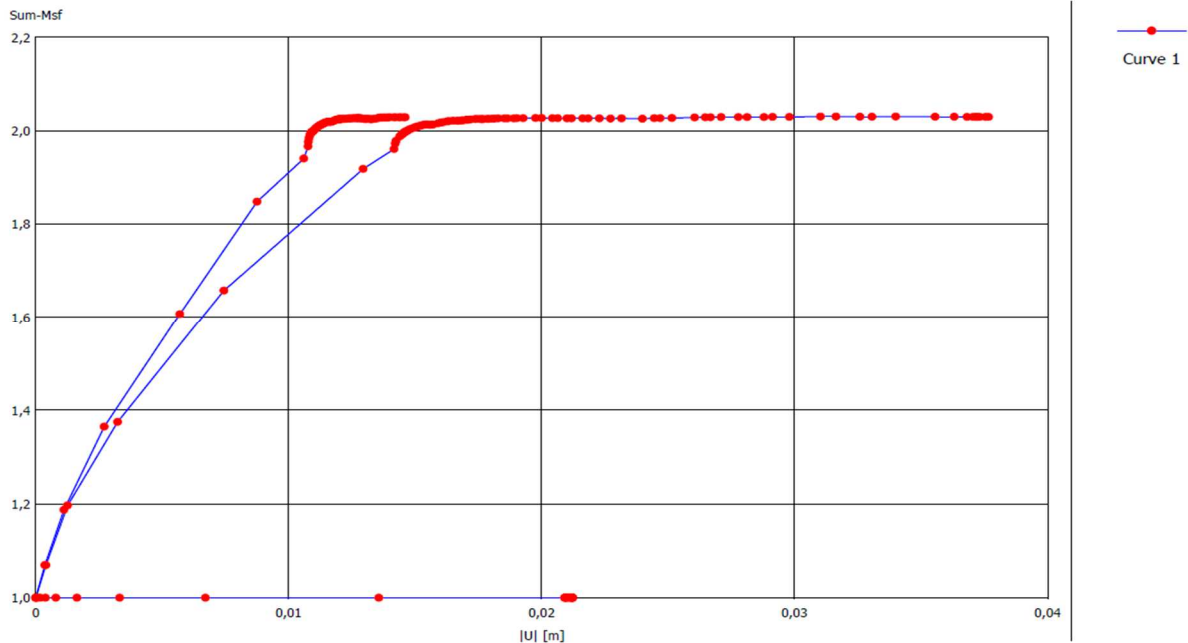


Figure IV.24 Évaluation du facteur de sécurité pour le processus de construction (point B).

1. Interprétation de la "Curve 1" (points rouges) :

- **Phase Initiale (Sum-Msf = 1.0) :** Au début de l'analyse ($\Sigma Msf = 1.0$), le sol a ses propriétés de résistance initiales. Le déplacement $|U|$ est très faible (proche de 0 m sur ce graphique), correspondant aux déformations élastiques ou légèrement plastiques sous les charges de la phase de construction "point B".
- **Phase de Comportement Élasto-Plastique Stable (Sum-Msf de 1.0 à environ 2.0) :** À mesure que ΣMsf augmente (la résistance du sol est artificiellement réduite), les déplacements $|U|$ augmentent de manière progressive. Par exemple, pour $\Sigma Msf \approx 1.6$, $|U| \approx 0.007$ m (7 mm). Pour $\Sigma Msf \approx 2.0$, $|U| \approx 0.012$ m (12 mm). La pente de la courbe est encore relativement raide.
- **Point d'Inflexion / Début de Plastification Significative (autour de Sum-Msf ≈ 2.0 à 2.03) :** La courbe commence à s'infléchir de manière plus marquée. Cela indique que le sol entre dans un état de plastification plus généralisé. Des réductions de résistance supplémentaires (petites augmentations de ΣMsf) entraînent des augmentations de déplacement de plus en plus importantes. Un mécanisme de rupture commence à se développer.
- **Plateau de Rupture (Sum-Msf se stabilisant autour de 2.03 - 2.04) :** La courbe devient presque horizontale. Les déplacements $|U|$ augmentent très rapidement (de ~ 0.012 m à plus de 0.038 m) pour une valeur quasi constante de ΣMsf . C'est le signe que le système a atteint sa capacité portante limite selon les critères numériques. Le calcul s'arrête ou montre une non-convergence si ΣMsf était augmenté davantage.

Dans le cotée droite, généralement l'inclinomètre n'enregistre pas des déplacement significatif comme la coté gauche.

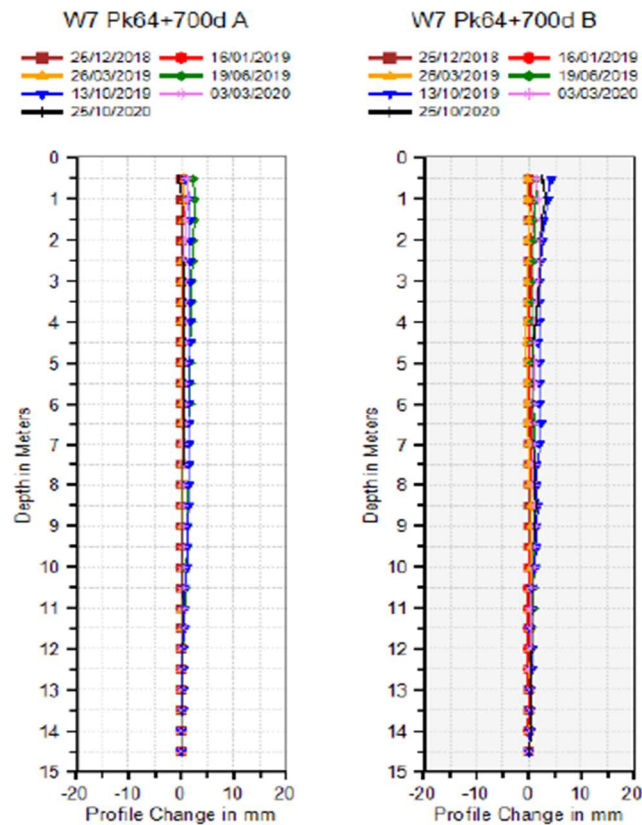


Figure IV.25 : résultats inclinométrique.

Conclusion :

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié la modélisation en utilisant une analyse numérique. Cette étape a été réalisée avec le logiciel Plaxis 2D basé sur la méthode des éléments finis. Pour avancer dans notre travail, nous avons suivi plusieurs étapes clés. La première consiste à définir la géométrie. Ensuite, nous avons créé le maillage pour subdiviser la région. La loi de comportement du sol et les conditions aux limites ont aussi été importantes. Après cela, nous avons appliqué le chargement nécessaire. Enfin, tout cela permet de calculer la déformation de la structure. Notre étude porte sur la partie de l'autoroute à l'ouest de la ville de Tlemcen.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

L'étude des routes commence toujours par une étude géotechnique comme tout autre projet, elle se base sur les données d'observations sur le site, les essais réalisées in-situ et les essais au laboratoire qui permettent d'avoir un aperçu global sur les couches constituant le terrain et leurs caractéristiques en particulier la cohésion et l'angle de frottement, qui nous aide dans la modélisation numérique.

Cette mémoire s'inscrit dans le cadre général pour l'étude d'un tronçon de l'autoroute Est-Ouest, de Tlemcen vers Sidi Belabes, désigné la section W7 (PK 64+700) de la partie autoroute Tlemcen,

En ce qui concerne la méthodologie suivie dans ce travail était de faire une modélisation de ce tronçon de l'autoroute pour déterminer la déformation de la chaussée, cette analyse fait par un calcul par éléments finis à l'aide du logiciel plaxis, d'après les résultats d'analyse par plaxis nous avons extrait que Ces résultats nous permettent d'aborde de confirmer .

Le remblai de la couche de forme suivant la modélisation effectue est généralement stable dans les conditions statique, le facteur de sécurité global contre la rupture du sol est d'environ **2,03 - 2,04** :

- Cela signifie que la résistance réelle du sol (cohésion et frottement) est environ 2,03 à 2,04 fois supérieure à la résistance qui serait juste suffisante pour provoquer la rupture sous les charges de cette phase de construction.
- Un FS de cette ampleur est généralement considéré comme acceptable, voire bon, pour de nombreuses applications de stabilité en géotechnique (souvent, un FS minimum de 1.3 à 1.5 est requis, mais cela dépend des normes).
- Le déplacement maximal associé à l'atteinte de ce facteur de sécurité (juste avant la rupture théorique) est de l'ordre de 0.020 m à 0.030 m (2 à 3 cm), comme le montrent les derniers points où le calcul a convergé.

Les dégradations remarquées sur la couche de roulement sont généralement des fissures longitudinale proche de la rive (bord) de la chaussée en plus du décollement du caniveau coté Nord (point A), et cela sont dus généralement a des affaissement (déplacement) dans les chouches inferieures comme il est montré dans la figures de l'iclinomètre gauche (figure IV.22). Ces affaissement et dégradation est du généralement au phénomène de migration des grains de sols avec l'eau interstitielle suivant la pente du terrain, qui entraine un réarengement des grains avec des affessements.

Conclusion Générale

En perspectives , ils bien recomender de vérifier la stabilité dans les conditions dynamiques, et dans le cas de la modélisation des couches de surface (couches de fondation, de base, et de roulement,...).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Internet (<https://www.infociments.fr/route/caracteristiques-generales-des-chaussees>).
- [2] : Internet (https://pikabu.ru/story/za_povorotom_11430622).
- [3] : Internet (<https://pixabay.com/photos/highway-to-travel-ride-cars-2228541/>).
- [4]: Internet(https://www.facebook.com/permalink.php/?story_fbid=1039884471470829&id=100063478579387)
- [5]: Internet (<https://centenaire.org/fr/en-france/quest-ce-quun-comite-departemental-du-centenaire>).
- [6]Internet(https://www.google.com/search?vsrid=CNeLpd64tqWw5gEQAhgBIiRIOTBmOGJjMS0yMWExLTQ0MWItYWU5NS05YWZjZTE4NDgwN2Y48pyOubirjQM&vsint=CAIqDAoCCAcSAggKGAEgATojChYNAAAAPxUAAAA_HQAAgD8lAACAPzABEOcDGIICJQAAGD8&udm=26&lns_mode=un&source=lns.web.cntpubb&vsdim=487,258&gsessionid=eZ9CNw6c1RBOaCdre20X7YMTTEQ4YqTDAFpfBGNEOCnZU8h6sdKacCg&lsessionid=0tswJz_0FYEsFAtH4LfPcVtCtHJ2jb9Z0YABGMNZfnf3k_1MgpWvAJg&lns_surface=44&lns_vfs=e&qsubts=1747513149316&biw=487&bih=258&hl=ar#vhid=gvx2eMqjHWwiSM&vssid=mosaic).
- [7] : Internet (<https://aldarplus.com/35689.html>)
- [8] : Etudes générales technique et économique des aménagements routiers. (B40 normes Techniques d'aménagements des routes).
- [9] : Roger, Coquard. Route circulation tracé et construction. Livre. Paris.
- [10] : SETRA ,2000; ICTAAL. Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des Autoroutes de liaison. Paris.
- [11] : Djelti, Abdelkader Zakaria ; Hattou, Mohammed, (2009). Etude de la réhabilitation du Chemin de wilaya CW54.Mémoire d'ingénieur, Tlemcen, université.
- [12] : Chebrak D, (2012). Étude du phénomène de l'orniérage de chaussées bitumineuse ; cas de la route national dans la wilaya de Tizi Ouzou. Mémoire de magister, université.
- [13] : LCPC, SETRA, (2000), Réalisation des remblais et des couches de forme ; Guide Technique fascicule 1et2. 2ème édition. Paris.
- [14] : BARABET I ;(2012). Le traitement des sols pour la couche de forme, plateforme de Chaussée. Mémoire de magister, université.
- [15] : LCPC, SETRA, Bagneux, 1998, Catalogue des structures types de chaussées neuves. Paris : ministres de l'équipement des transports et du logement.
- [16] : JGOONIA Ablatif, Rôle de l'ingénieur Topographe dans la construction d'une route.
- [17] : Catalogue des dégradations de surface des chaussées, LCPC, fichier PDF, 1998.
- [18] : Catalogue pour la réalisation des relevés visuels de dégradations sur chaussées aéronautiques, Service Technique de l'Aviation Civile, fichier PDF, 2007.
- [19] : Catalogue des dégradations de surface des chaussées, LCPC, fichier PDF, 1998.

- [20] :Internet(https://www.google.com/search?q=les+affaissements+des+routes&rlz=1C1ASVAenDZ897DZ897&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjWcCsyKLRhVXTBUIHSRdAr4Q_AUoAXoE CAwQAw#imgrc=gamPIrT_HZ6m6M)
- [21] :Internet(https://www.google.com/search?q=les+bourellets+des+routes&rlz=1C1ASVA_enDZ897DZ897&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwitoNujyaLrAhUeRBUIHavaAMAQ_AUoAXoEC AwQAw&biw=1360&bih=657#imgrc=vJWUspPMd2bNjM)
- [22] : Elaboration d'un catalogue des dégradations des chaussées au Sénégal
- [23] : Manuel international de l'entretien routier, Volume III, Routes revêtues, Association Mondiale de la Route, 1997.
- [24] : JEUFFROY, Georges & SAUTEREY, Les chaussées en béton de ciment, Presses ENPC,1989.
- [25] : LANKOANDE, Issaka-OUEDRAOGO, Ahamado. Tôle ondulée et Stabilisation. Mémoire de Fin d'Étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, ENSUT, Juillet 2005.
- [28] : Géotechnique HSE. La Stabilité Des Talus En Géotechnique
- [34] : Yahiaoui Djarir, M. Résumé du cours de Méthode des Éléments Finis, Université de Batna
- [35] : BRGM. Simulation par la méthode des éléments finis de sols et d'ouvrages géotechniques
- [36] : Terrasol. Plaxis 2D - Modélisation et analyse aux éléments finis
- [37] : Terrasol. Plaxis 3D - Modélisation et analyse aux éléments finis
- [38] : B. Schrefler & R. Gawin, "The Finite Element Method in Geotechnical Engineering," Géotechnique, 2000³.
- [39] : Wikipédia. Théorie de Mohr-Coulomb