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

Université Yahia Farés de Médéa
Faculté de Technologie
Département de génie civil

**Projet de Fin d'étude**

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option: Génie Géotechnique

# Contribution à l'étude de renforcement par géotextile de chaussée souple sur un sol expansif

Présenté par :

**Mr .BENKALI Zakaria**
**Mr. KADIK Badreddine**

Encadré par :

**Mme. AMRI Salima**
**Mr. SERRAYE Mahmoud**

Juin 2017

# *REMERCIMENTS*

*En premier lieu, nous tenons d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier et à exprimer nos gratitudes à notre encadreuse Madame. AMRI.SALIMA qui nous a orienté et nous a soutenu durant notre projet de fin d'études.*

*Nous témoignons reconnaissance et gratitudes aux aimable crut personne, quel que soit de près ou de loin, qui nous ont soutenu, acceptent et orientant durant notre projet de fin d'étude.*

*Nous n'oublions pas de Remercier vivement et de tout cœur, l'ensemble des enseignants de génie civil.*

*En fin nous remercions tous ceux qui ont contribué de loin ou de prés à la réalisation de ce modeste travail.*

# RESUME

L’utilisation des géotextiles de renforcement est devenue très répandue dans le domaine de Génie civil (terrassement, constructions routière, ferroviaire et aéroportuaire, murs de soutènement et talus très pentus). Ces matériaux de renforcement offrent des solutions économiques et orientées vers l’avenir. La pénurie générale de terrains constructibles et les consignes de protection de l’environnement, entraînent des mesures de construction sur des terrains difficiles. Le matériau composite (sol-géotextile ou géogrille) améliore la résistance au chargement et réduit le volume de l’emprise de l’ouvrage.
Le présent travail est une étude numérique par élément fini d’une chaussée souple non renforcé et renfoncé par des nappes de géotextile reposant sur un sol expansif, en vus de voir l’effet des géotextiles sur l’amélioration de portance de chaussé par conséquence augmentation de la durée de vie de l’ouvrage. Cette analyse numérique a été fait à l’aide de code de calcule Plaxis 2D.

**Mots clés :** Chaussée, portance, déformation, géotextile, Plaxis 2D.

# ABSTRACT

The use of geotextile of reinforcement and geogrid became very widespread in the field of civil engineering (earthwork, road constructions, railways and airports, walls retaining and slopes very sloping). These materials of reinforcement offer economic solutions and directed towards the future. The general shortage of constructible grounds and the instructions of environmental protection, involve measurements of construction on difficult grounds. The composite material (ground-geotextile or geogrid) improves resistance to the loading and reduces the volume of the scale of the work.

The present work is a numerical study by finite element of a flexible pavement not reinforced and reinforced by geotextile layers resting on an expansive soil, in view to see the geotextile effect on the improvement of pavement lift consequently increase of The duration of the life of the pavement, This numerical analysis was done using code of calculation Plaxis 2 D.

**Keywords:** Pavement, Lift, deformation, geotextile, Plaxis2D.

# ملخص

أصبح إستخدام الجيوتكستيل منتشرا على نطاق واسع في مجال الهندسة المدنية (أعمال الحفر, بناء الطرق, السكك الحديدية و المطارات، الجدران الاستنادية والمنحدرات الحادة جدا) هذه المواد المقوية تقدم حلولا اقتصادية وموجهة نحو المستقبل. النقص العام في الأراضي الصالحة للبناء وتعليمات حماية البيئة, يقضي تدابير بناء في مناطق وعرة. المادة المركبة (أرض - جيوتكستيل - جيوغريل) يحسن المقاومة عند التحميل ويقلل من وقت إنجاز المشروع.
العمل الحالي هو دراسة عددية بواسطة العناصر المحددة لطريق غير مدعم و مدعم بإستخدام الجيوتكستيل هذا الطريق يقع على تربة توسعية, الهدف من ذلك هو رؤية تأثير الجيوتكستيل على تحسين قدرة التحمل و بالتالي زيادة عمر حياة الطريق. هذا التحليل العددي قدم عن طريق برنامج الحساب Plaxis 2D.

كلمات مفتاحية : طريق, قدرة الرفع, التشوه, جيوتكستيل, Plaxis 2D.

# Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... 1

## PARTIE A : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## CHAPITRE I
### GENERALITES SUR LES STRUCTURES DE CHAUSSÉE

I.1. Introduction ..... 3
I.2. Définition d'une chaussée ..... 3
I.3. Constitution et rôle d'une chaussée ..... 3
I.4. Les différents types de chaussées ..... 4
I.4.1. Les chaussées souples ..... 5
I.4.2. Les chaussées semi-rigides ..... 5
I.4.3. Les chaussées rigides ..... 5
I.5. Dimensionnement des corps de chaussées ..... 6
I.5.1. Paramètres influençant sur le dimensionnement ..... 6
I.5.2. Différentes Méthodes de dimensionnement ..... 7
I.6. Les dégradations des chaussées ..... 11
I.6.1. Les dégradations de déformations ..... 11
I.6.2. Les fissures ..... 14
I.6.3. Les arrachements ..... 18
I.6.4. Les mouvements de matériaux ..... 19
I.6.5. Phénomène de gonflement ..... 20
I.7. Conclusion ..... 22

## CHAPITRE II
### NOTION SUR LES GEOSYNTHETIQUE

II.1. Introduction ..... 23
II.2. Définition ..... 23

II.3. Déférent type de géosynthétique ..... 24
II.3.1. Produits perméables ..... 24
II.3.1.1. Géotextile ..... 24
II.3.1.2. Produits apparentés aux géotextiles ..... 27
II.3.2. Produits imperméables ..... 28
II.4. Fonctions des géosynthétique ..... 29
II.5. Techniques de disposition des géosynthétique ..... 30
II.6. Mécanismes de renforcement ..... 31
II.6.1. Mécanisme de confinement (autoblocage) latéral de la couche de base ..... 31
II.6.1.1. Empêchement de l'étalement latéral de l'agrégat de la base ..... 32
II.6.1.2. Augmentation de la rigidité de l'agrégat de la couche de base ..... 32
II.6.1.3. Amélioration de la distribution verticale des contraintes sur le sol de fondation ..... 33
II.6.1.4. Réduction des contraintes de cisaillement dans le sol de fondation ..... 33
II.6.2. Mécanisme de surface de rupture modifiée et augmentation de la capacité portante ..... 34
II.6.3. Mécanisme de membrane tendue ..... 34
II.7. Utilisation des géosynthétique dans le domaine routier ..... 35
II.7.1. Apport des géosynthétique sur le comportement mécanique des chaussées de routes ..... 36
II.7.2. Facteur d'efficacité (E) des géosynthétique dans les routes ..... 37
II.8. Conclusion ..... 37

# PARTIE B : ETUDE NUMERIQUE

## CHAPITRE III

### PRESENTATION DE L'OUTIL DE SIMULATION ET MODELES DE COMPORTEMENT

III.1. Introduction ..... 38
III.2. Aperçu de là méthode des éléments finis ..... 38
III.2.1. Historique ..... 38
III.2.2. Concepts de base ..... 38
III.2.3. Calculs par la MEF ..... 38
III.3. Présentation du logiciel ..... 40
III.3.1. Les points forts de Plaxis ..... 41

III.3.2. Les sous-programmes de Plaxis ..... 41
III.3.2.a. Le programme d'entrée de données (Input) ..... 41
III.3.2.b. Le programme de calcul (Calculations) ..... 41
III.3.2.c. Le programme de résultats (Output) ..... 42
III.3.2.d. Le programme courbes (Curves) ..... 42
III.3.3. La démarche de modélisation avec Plaxis ..... 42
III.3.3.1. Géométrie ..... 42
III.3.3.2. Conditions aux limites ..... 43
III.3.3.3. Définition des paramètres des matériaux ..... 43
III.3.3.4. Maillage ..... 43
III.3.3.5. Les conditions initiales ..... 43
III.3.3.6. Phase de calcul ..... 44
III.3.3.7. Visualisation des résultats ..... 44
III.3.4. Les modèles de comportements intégrés dans PLAXIS ..... 44
III.3.4.1. comportement élastoplastique ..... 45
III.3.4.2. Modèle élastique linéaire ..... 46
III.3.4.3. Modèle de Mohr-Coulomb ..... 47
III.3.4.4. Modèle de sol avec écrouissage (Hardening soil model) ..... 51
III.3.4.5. Modèle pour les sols mous (soft soil model) ..... 51
III.3.4.6. Modèle pour les sols mous avec fluage (soft soil creep model) ..... 51
III.3.4.7. Modèle pour les roches fracturées (jointed rock model) ..... 51
III.3.4.8. Modèle défini par l'utilisateur ..... 51
III.4. Conclusion ..... 51

## CHAPITRE IV
### PRÉSENTATION DE PROJET

IV.1. Introduction ..... 52
IV.2. Situation géographique ..... 52
IV.2.1. Situation géographique de wilaya ..... 52
IV.2.2. Situation géographique de site ..... 52
IV.3. La géologie de la région ..... 53
IV.3.1. Hydrologie de la région ..... 53

IV.3.2. La morphologie de la région ..... 54
IV.4. Reconnaissance géotechnique ..... 54
IV.4.1. Les essais physiques ..... 55
IV.4.2. Les essais mécaniques ..... 56
IV.4.3. Les essais chimique ..... 58
IV.4.4. Essai pressiométrique ..... 58
IV.5. Dimensionnement du corps de chaussée ..... 59
IV.5.1. Caractéristiques des sol-supports ..... 59
IV.5.2. Sollicitation par le trafic lourd ..... 59
IV.5.3. Structures de chaussée étudiée ..... 60
IV.6. Conclusion ..... 61

## CHAPITRE V
### MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU CORPS DE CHAUSSÉE RENFORCÉ

V.1. Introduction ..... 62
V.2. Impact de la roue charge de calcul ..... 62
V.3. Chargement ..... 62
V.4. Données géométriques du modèle ..... 63
V.5. Propriétés des matériaux du modèle ..... 64
V.6. Maillage ..... 65
V.7. Condition initiale ..... 65
V.8. Présentation des résultats du modèle de référence ..... 65
V.9. L'effet de déférente position de la nappe de géotextile ..... 70
V.10. Expérimentation des modèles variantes ..... 71
V.10.1. Modèle variante n°1 ..... 71
V.10.2. Modèle variante n°2 ..... 72
V.10.3. Modèle variante n°3 ..... 73
V.10.4. Modèle variante n°4 ..... 75
V.10.5. Comparaison entre les modèles variantes et le modèle de référence ..... 76
V.11. Étude paramétrique ..... 77
V.11.1. Effet de la variation de module élastique de sol support ..... 77

V.11.2. Effet de la variation de coefficient de Poisson .....78
V.11.3. Effet de la variation de la cohésion, l'angle de frottement et de dilatance du sol support.....79
V.12. Conclusion ..... 80

CONCLUSION GÉNÉRALE..... 81

# LISTE DES FIGURES

**Figure I.1:** Coupe type d'une structure de chaussée et terminologie des différentes couches ..... 3
**Figure I.2:** Chaussée souple ..... 5
**Figure I.3:** Chaussées semi-rigides ..... 5
**Figure I.4:** Chaussées rigides ..... 5
**Figure I.5:** Ornière à grand rayon ..... 12
**Figure I.6:** Affaissement de rive ..... 13
**Figure I.7:** Affaissement hors rive (ou flache) ..... 13
**Figure I.8:** Tôle ondulée ..... 14
**Figure I.9:** Fissure longitudinale dans les bandes de roulement ..... 15
**Figure I.10:** Fissure longitudinale non spécifique aux bandes de roulement ..... 16
**Figure I.11:** Fissure d'adaptation ..... 17
**Figure I.12:** Faïençage dans les bandes de roulement ..... 18
**Figure I.13:** Tête de chat ..... 18
**Figure I.14:** Nid de poule ..... 19
**Figure I.15:** Remontée de fines ..... 20
**Figure I.16:** Apparition des premières fissures sur les accotements (fin de saison sèche) ..... 21
**Figure I.17:** Apparition des premières déformations et infiltration d'eau à travers les fissures (début de la saison des pluies) ..... 21
**Figure I.18:** Chute de portance des zones saturées apparition des fissures longitudinales (fin de saison des pluies) ..... 21
**Figure II.1 :** Misse en ouvre du géotextile dans une chaussé routière ..... 23
**Figure II.2:** Déférent type de géosynthétique ..... 24
**Figure II.3:** Échantillons de géotextiles non-tissés ..... 25
**Figure II.4:** Les tissés de fils monofilaments, multifilaments et les tissés de bandelettes ..... 26
**Figure II.5:** Exemple de tricoté démaillable ..... 27
**Figure II.6:** Échantillons de géogrilles ..... 27
**Figure II.7:** Échantillons de géocomposite ..... 28
**Figure II.8:** Échantillons de géosynthétique bentonitique (GSB) ..... 28
**Figure II.9:** Échantillons de géomembrane ..... 29
**Figure II.10:** Principales fonctions des géosynthétique ..... 30
**Figure II.11:** Structures de disposition des géosynthétique ..... 31
**Figure II.12:** Mécanisme de Confinement (autoblocage) latéral de la couche de base ..... 33

**Figure II.13:** Surface de Rupture Modifiée et Augmentation de la capacité portante ..... 34
**Figure II.14:** Membrane tendue ..... 35
**Figure II.15:** Géosynthétique dans l'ingénierie des routes ..... 35
**Figure II.16:** Apport des géosynthétique sur le comportement mécanique des chaussées de routes ..... 36
**Figure II.17:** Augmentation de la durée de vie de la chaussée en lien avec l'utilisation d'un renforcement géosynthétique ..... 37
**Figure III.1:** Modèle monodimensionnel du comportement élastique parfaitement plastique ..... 45
**Figure III.2:** Représentation du comportement élastique parfaitement plastique ..... 45
**Figure III.3:** Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage ..... 46
**Figure III.4:** Courbe contrainte-déformation pour le modèle élastique linéaire ..... 46
**Figure III.5:** Surface de charge adoptée par le modèle MC pour un sol sans cohésion ..... 47
**Figure III.6:** Modélisation d'un essai de compression triaxial avec le modèle de Mohr-Coulomb (a) et représentation des contraint dans le plan de Mohr (b) ..... 48
**Figure III.7:** Définition du module à 50% de la rupture ..... 49
**Figure III.8:** Angle de dilatance ..... 50
**Figure IV.1:** Situation géographique de la wilaya de Médéa ..... 52
**Figure IV.2:** Situation géographique de site ..... 53
**Figure IV.3:** Abaque de Casagrande pour le classement des sols ..... 56
**Figure IV.4:** Présentation de la structure de chaussée ..... 61
**Figure V.1:** Principe d'application des charges ..... 63
**Figure V.2:** Présentation du cas étudié ..... 63
**Figure V.3:** Génération du maillage. a) sans renforcement ; b) avec renforcement ..... 65
**Figure V.4:** Déformation du maillage. a) sans renforcement ; b) avec renforcement ..... 66
**Figure V.5:** Déplacement vertical. a) sans renforcement ; b) avec renforcement ..... 67
**Figure V.6:** Contrainte totale. a) sans renforcement ; b) avec renforcement ..... 68
**Figure V.7:** Déplacement vertical en fonction de profondeur (sans et avec renforcement) ..... 69
**Figure V.8:** Déplacement vertical en fonction de profondeur de déférentes positions ..... 70
**Figure V.9:** Résultats de déplacement vertical et contraint total de modèle réduit 1 ..... 71
**Figure V.10:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical en fonction de profondeur de modèle de référence et modèle réduit n°1 ..... 72
**Figure V.11:** Résultats de déplacement vertical et contraint total de modèle réduit 2 ..... 72
**Figure V.12:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical en fonction de profondeur de modèle de référence et modèle réduit n°2 ..... 73
**Figure V.13:** Résultats de déplacement vertical et contraint total de modèle réduit 3 ..... 74

**Figure V.14:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical en fonction de profondeur de modèle de référence et modèle réduit n°3..... 74

**Figure V.15:** Résultats de déplacement vertical et contraint total de modèle réduit 4 ..... 75

**Figure V.16:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical en fonction de profondeur de modèle de référence et modèle réduit n°4..... 76

**Figure V.17:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical en fonction de profondeur de modèle de référence et les 4 modèles réduits..... 76

**Figure V.18:** Influence de module d'élasticité du sol support sur les déplacements verticaux de la chaussée ..... 78

**Figure V.19:** Influence de coefficient de poisson du sol support sur les déplacements verticaux de la chaussée ..... 79

# LISTE DES TABLEAUX

**Tableau I.1:** Coefficient d'équivalence ..... 8
**Tableau I.2:** Classes de trafic (catalogue de dimensionnement des chaussées neuves) ..... 9
**Tableau I.3:** Classe de sol (catalogue de dimensionnement des chaussées neuves) ..... 10
**Tableau IV.1:** Cordonnées de la section (Référence: GOOGLE EARTH) ..... 52
**Tableau IV.2:** Résultats des essais physiques ..... 56
**Tableau IV.3:** Résultats des essais mécanique ..... 58
**Tableau IV.4:** Résultats des essais chimique ..... 58
**Tableau IV.5:** Sondage pressiométrique SP-002-1.7-S1, section 1 ..... 59
**Tableau IV.6:** Volumes de trafic lourd de Section Seghouane – Moudjebeur ..... 60
**Tableau IV.7:** Validation de structure de chaussée ..... 60
**Tableau V.1:** Les cordonnées de La géométrie ..... 64
**Tableau V.2:** Caractéristiques physique et mécanique de déférentes couches de chaussée ..... 64
**Tableau V.3:** Propriété du géotextile non-tissé de type ALVEOTER® AFITEX ..... 64
**Tableau V.4:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale (sans et avec renforcement) ..... 69
**Tableau V.5:** Résultats des déplacements verticaux et contraints totaux de déférentes positions ..... 70
**Tableau V.6:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale de modèle de référence et modèle réduit n°1 ..... 71
**Tableau V.7:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale de modèle de référence et modèle réduit n°2 ..... 73
**Tableau V.8:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale de modèle de référence et modèle réduit n°3 ..... 74
**Tableau V.9:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale de modèle de référence et modèle réduit n°4 ..... 75
**Tableau V.10:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale de modèle de référence et les 4 modèles réduits ..... 77
**Tableau V.11:** Influence de module d'élasticité du sol support ..... 78
**Tableau V.12:** Influence de coefficient de poisson du sol support ..... 79

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'histoire de la route est intimement liée au niveau de développement technologique et de la croissance économique des nations et des civilisations. La route romaine dont les traces sont encore apparentes à ce jour, témoigne de l'avancée industrielle de l'empire et de la place privilégiée accordée aux réseaux de communication.

La route n'est pas la seule infrastructure de transport, on trouve aussi d'autres moyens comme le chemin de fer, les voies aériennes et les voies maritimes, mais le transport routier est dominant, et même si les technologies de l'information se développent, les déplacements routiers liés tant à la vie quotidienne qu'au tourisme sont des réalités incontournables pour encore de nombreuses années. La route joue un rôle moteur dans l'aménagement du territoire, elle favorise l'implantation d'activités économiques et industrielles et réduit les coûts de transport et donc de production.

En Algérie, l'évolution démographique et la forte urbanisation ont engendré plusieurs mutations, ainsi des recherches et des études des tracés linéaires des routes et d'autoroutes ont été menées à travers le pays afin d'améliorer les infrastructures de transport.

Par ailleurs l'augmentation exponentielle du trafic routier, l'énorme sollicitation des chaussés du réseau routier et la qualité moyenne a crée d'important problèmes dont la diminution de la durée de vie des chaussées et son impact sur la qualité et la sécurité des usagés.

À cet égard, on est amené à penser à augmenter la durée de vie des chaussées par l'introduction de techniques innovantes tel que les géosynthétiques menant à éliminer ou plutôt diminuer les risques des dégradations, tells que l'orniérage et la fissuration et les différentes anomalies qui, abaissent considérablement la qualité de la chaussée et à son niveau de service rendu.

Les géosynthétiques sont des produits plans fabriqués à partir de polymères synthétiques tels que le polypropylène, le polyester, le polyéthylène, le PVC, etc. Ces matériaux sont fortement résistants à la dégradation biologique et chimique, mais ne supportent pas les rayons ultraviolets contre lesquels ils sont protégés par le sol d'enrobage. Les polymères synthétiques sont employés depuis plus de 35 ans avec le sol, la roche, ou autre matériau lié à la géotechnique (géo), ou ce qui explique l'appellation géosynthétiques qui signifie application du synthétique dans la géotechnique, en tant qu'un élément d'un projet ou d'un système de génie civil. Comme pour l'acier avec le béton, le synthétique est un produit qui travaille principalement en traction et son incorporation dans le sol devient utile si ce dernier est soumis à des déformations de tension et des cisaillements.

Il est clair que les géosynthétiques ont révolutionné beaucoup d'aspects de notre pratique et dans quelques applications ils ont entièrement remplacé le matériau de construction traditionnel. Dans beaucoup de cas l'utilisation d'un géosynthétique permet l'augmentation de manière significative du

facteur de sécurité, l'amélioration de la performance, et la réduction des coûts en comparaison avec une conception conventionnelle et une construction alternative.

Une application spécifique des géosynthétiques et qui concerne le sujet de ce mémoire de recherche est le renforcement des chaussées par géosynthétiques pour améliorer la portance des chaussées reposant sur un sol support de faible portance.

Dans le cadre de ce travail, nous présentons une étude numérique d'une chaussée souple non renfoncé et renfoncé par géotextile reposant sur un sol support de faible portance en vue d'améliorer la portance et d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage, cette étude numérique a été réalisé à l'aide de code de calcul «Plaxis2d».

Le présent mémoire est scindé en deux parties :

**La première partie** consacrée à la recherche bibliographique, comporte deux chapitres :
Le premier contient des éléments bibliographiques sur les chaussées, on commence par la description de la structure de chaussée, puis la présentation des différentes familles de structures de chaussée. On s'intéressera ensuite aux méthodes de dimensionnement des structures de chaussée, et à la fin les dégradations qui peuvent affecter la structure de chaussée.

Le deuxième chapitre présente une notion élémentaire sur les géosynthétiques, déférents types, leur fonctionnement, les mécanismes de renforcement et techniques de disposition des géosynthétique et l'utilisation des géosynthétique dans le domaine routier.

**La deuxième partie** du mémoire, consacrée à l'étude numérique, comporte trois chapitres:
Le troisième chapitre présente de manière succincte le code de calcul utilisé dans ce mémoire, et notamment les modèles de comportement mis en œuvre dans plaxis2d.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation du site étudié, situation géographique, géologie du site, investigation géotechnique, et à la fin le dimensionnement du corps de chaussée souple qui sera utilisé dans notre étude.

Le cinquième chapitre représente notre contribution dans ce mémoire, à savoir la modélisation numérique du corps de chaussée renforcé par géotextile.

# CHAPITRE I

## GENERALITES SUR LES STRUCTURES DE CHAUSSEE

## I.1. Introduction:

Depuis la nuit des siècles, les romains construisaient les chaussées, pour la circulation impériale, avec un objectif essentiellement militaire, celui de permettre un déplacement rapide des légions en différents points de l'empire, et cela quelles que soient les conditions météorologiques. Les chaussées de cette époque constituaient les dallages d'une superposition de couches d'épaisseurs différentes, Cette superposition a été transmise aux chaussées actuelles qui présentent une structure multicouche surmontant un ensemble appelé plate-forme support de chaussée.

## I.2. Définition d'une chaussée:

Une chaussée peut être définie comme une structure plane, conçue et dimensionnée pour garantir l'écoulement du trafic dans de bonnes conditions de visibilité, de sécurité et de confort pour les usagers et assurer une fonction pour une période de service minimale fixée au stade de l'élaboration du projet.[1]

## I.3. Constitution et rôle d'une chaussée:

Les chaussées, se présentent comme des structures multicouches dont les épaisseurs doivent être suffisantes de manière à supporter sans dégradation la pression verticale transmise au sol. Comme la pression dans la couche granulaire décroit régulièrement en profondeur, on peut constituer une chaussée par la superposition de couches de caractéristiques mécaniques croissantes. En général, on rencontre les couches suivantes à partir du sol :

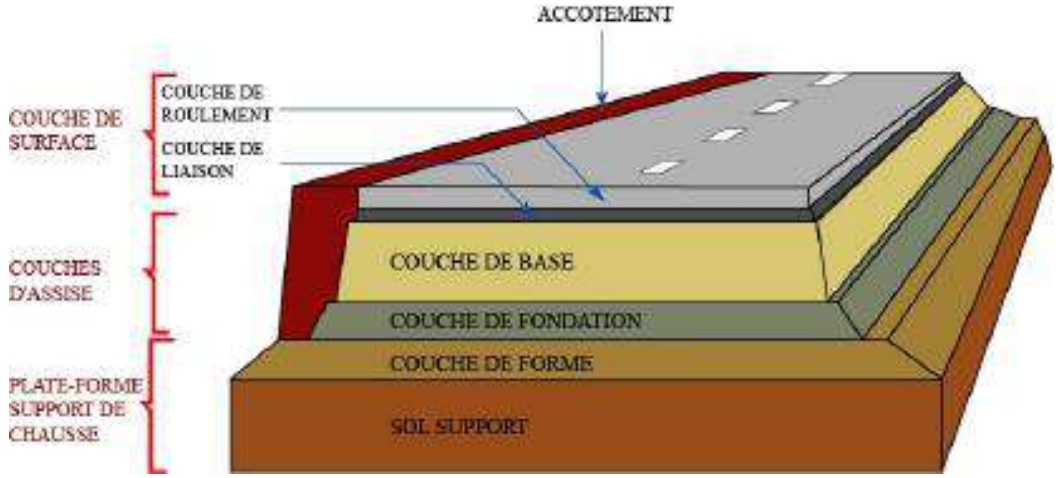



**Figure I.1:** Coupe type d'une structure de chaussée et terminologie des différentes couches [33]

**1. Le sol support:** Est généralement surmonté d'une couche de forme pour former un ensemble appelé plate-forme support de chaussée. Cette dernière sert, comme son nom l'indique, de support au corps de chaussée.

**2. Couche de forme:** Couche de forme est un élément de transition qu'on l'introduit entre le sol support et les couches de sol afin d'améliorer et d'uniformiser la portance du sol. Cette couche, ne fait pas partie

intégrante de la chaussée, elle peut constituer soit de matériaux grenus roulés ou concassés, soit de matériaux traités aux liants hydrauliques. Elle a plusieurs fonctions :

- Lors des travaux, elle protège le sol support, contribue au nivellement et permet la circulation des engins de chantier.

- Elle permet de rendre plus homogènes les caractéristiques du sol terrassé et de protéger ce dernier du gel.

**3. Les couches d'assise:** assise de chaussée se décompose en deux sous-couches : la couche de fondation, surmontée de la couche de base.

- **Couche de fondation:** elle est constituées de gravier concassé 0/40 d'une épaisseur de 20 cm. Elle répartit les pressions sur le support, afin de maintenir les déformations.

- **Couche de base:** elle est constituée de gravier 0/25 et bitume elle est d'une épaisseur de 20 cm. cette couche supporte exactement l'action des véhicules à l'intérieur de laquelle les pressions élevées s'atténuent avant d'être transmise à la couche de fondation.

**4. La couche de surface:** couche de surface a généralement une structure bicouche :

- **La couche de roulement:** c'est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. On lui demande des qualités d'usage précises à savoir : une forte adhérence, une bonne drainabilité, un bon niveau d'uni et une réduction du bruit de roulement des véhicules. Selon les besoins, on utilise soit la technique des enrobés épais, soit celle des enrobés minces ou bien celle des enrobés très minces voire ultra minces.

- **La couche de liaison:** l'apport structurel de cette couche est secondaire (sauf les chaussées à assise granulaire dont la couche de surface est la seule couche liée), elle est tributaire de la pérennité de la chaussée. [1]

## I.4. Les différents types de chaussées:

Il existe trois types de chaussée suivant la nature des matériaux constitutifs et l'épaisseur des couches :

- Chaussée souple.
- Chaussée semi-rigide.
- Chaussée rigide.

### I.4.1. Les chaussées souples:

Elles constituent l'immense majorité des routes actuelles. Elles sont composées d'une fondation constituée d'un matériau non traité mais stabilisé mécaniquement (compact), d'une couche de base constituée d'un matériau traité au liant hydrocarbonés, et une couverture bitumineuse mince (couche de roulement) moins de 15 cm.

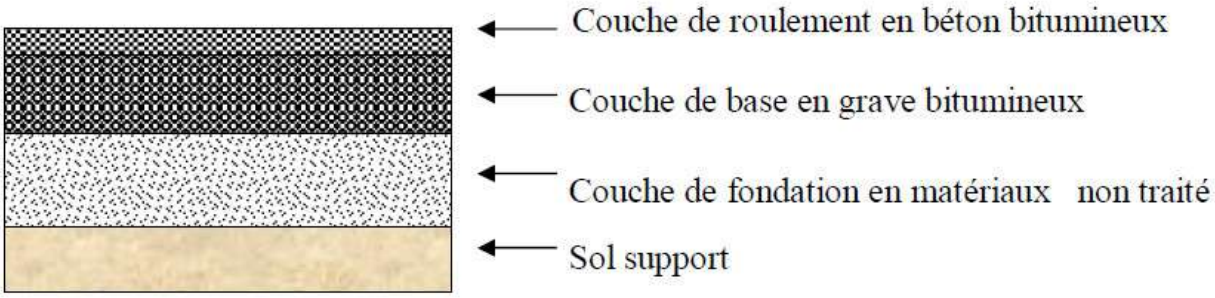



**Figure I.2:** Chaussée souple [34]

### I.4.2. Les chaussées semi-rigides:

Elles comportent une couche de base (et quelque fois une couche de fondation) traité au liant hydraulique (ciment).

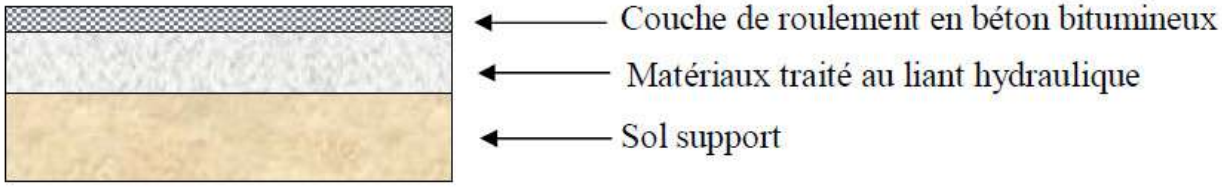



**Figure I.3:** Chaussées semi-rigides [34]

### I.4.3. Les chaussées rigides:

La chaussée est constituée par une couche de fondation en grave ciment, surmontée par une dalle de béton. Des joints transversaux sont effectués tous les 4 à 5 m pour éviter une fissuration anarchique du béton, ainsi que des joints longitudinaux. [2]

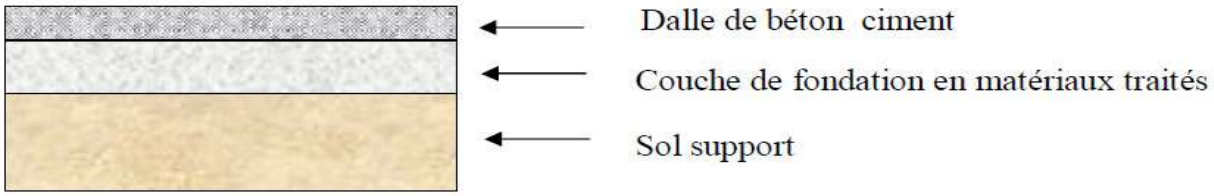



**Figure I.4:** Chaussées rigides [34]

## I.5. Dimensionnement des corps de chaussées:

Le dimensionnement des structures constitue une étape importante de l'étude d'un projet routier, car la chaussée devra résister aux agressions des agents extérieurs et à la surcharge d'exploitation: action des essieux des véhicules et notamment les poids 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. La qualité de la construction de chaussées joue à ce titre un rôle primordial, celle-ci passe d'abord par une bonne reconnaissance du sol support et un choix judicieux des matériaux à utiliser, il est ensuite indispensable que la mise en œuvre de ces matériaux soit réalisée conformément aux exigences arrêtées.

### I.5.1. Paramètres influençant sur le dimensionnement:

Le dimensionnement basé sur la connaissance d'un certains paramètres fondamentaux liés au :

- Trafic
- Climat
- Sol support

**1. Trafic:**

Le trafic principalement le trafic poids lourds, est l'un des paramètres prépondérants dans la conception des structures, il intervient en fait d'abord dans le choix des matériaux puis dans le dimensionnement proprement dit de façon plus détaillée , le trafic gouverne les choix suivants :

- Choix d'un niveau de service qui se traduira notamment par le choix de la couche de surface.
- Choix de l'épaisseur des structures qui implique la fixation d'un niveau de risque.

Il est nécessaire de caractériser le trafic à partir de deux paramètres :

- Trafic poids lourds «**T**» à la mise en service, résultat d'une étude de trafic et de comptages sur les voies existantes ;
- Trafic cumulé sur la période considérée qui est donnée par :

$$\mathbf{N = T.\ A.\ C}$$

Avec :
**N** : Trafic cumulé.
**A** : Facteur d'agressivité globale du trafic.
**C** : Facteur de cumul : $\mathbf{C = [(1 + t)^n - 1] / t}$
**T**: Taux de croissance du trafic.
**N**: Nombre d'années de service (durée de vie) de la route.

**2. Climat:**
L'environnement extérieur de la chaussée est l'un des paramètres d'importance essentielle dans le dimensionnement ; la pluie influe sur la teneur en eau des sols qu'elle détermine leurs propriétés, la température a une influence marquée sur les propriétés des matériaux bitumineux et conditionne la fissuration des matériaux traités par des liants hydrauliques.

**3. Sol support:**
Les structures de chaussées reposent sur un ensemble dénommé « plate-forme support de chaussée» constitue du sol naturel terrassé, éventuellement traité, surmonté en cas de besoin d'une couche de forme.
Les plates formes sont définies à partir :

- De la nature et la portance du sol support.
- De la nature et de l'épaisseur de la couche de forme. [3]

## I.5.2. Différentes Méthodes de dimensionnement:

Pour la détermination de l'épaisseur de chaussée, il faut commencer par l'étude du sol. Les formules utilisées par les bureaux d'études sont empiriques et/ou rationnelles, et basées sur :

- Détermination de l'indice portant du sol.
- Appréciation du trafic composite.
- Utilisation d'abaque ou formule pour déterminer l'épaisseur de chaussée.

On distingue deux méthodes:

- Les méthodes empiriques dérivées des études expérimentales sur les performances des chaussées.
- Les méthodes dites « rationnelles » basées sur l'étude théorique du comportement des chaussées.

Ces méthodes s'appuient sur trois paramètres :

- La force portante : Obtenue par les différents essais géotechniques.
- Le trafic : Charge par voie, pression de gonflage et répétition des charges.
- Caractéristiques mécaniques des différents matériaux constituant les couches on peut citer.

## 1. Méthode C.B.R (California – Bearing – Ratio):

C'est une méthode (semi empirique), elle se base sur un essai de poinçonnement sur un échantillon de sol support en compactant les éprouvettes de (90 à 100 %) de l'O.P.M. les abaques qui donnent l'épaisseur «e» des chaussées en fonction des pneus et du nombre de répétitions des charges, tout en tenant compte de l'influence du trafic.
L'épaisseur est donnée par la formule suivant :

$$e = \frac{100 + (\sqrt{p})\left[75 + 50\log\left(\frac{N}{10}\right)\right]}{Icbr + 5}$$

$I_{CBR}$ : Indice CBR
N : Désigne le nombre moyen de camion de plus 1500 kg à vide
P : Charge par roue P = 6.5 t (essieu 13 t)
Log : Logarithme décimal

L'épaisseur de la chaussée, obtenue par la formule CBR améliorée, correspond à un matériau bien défini (grave propre bien gradué). Pour ce matériau, le coefficient d'équivalence est égal à 1. [4]

Et pour les qualités différentes, il faudra utiliser le coefficient ($e_i$), tel que :

$$e = \sum a_i \, e_i$$

Avec : $a_i$ : coefficients d'équivalences ; $e_i$ : épaisseurs réelles.

| Matériaux utilisées | Coefficient d'équivalence |
|---|---|
| Béton bitumineux – enrobé dense | 2.00 |
| Grave bitume | 1.50 à 1.70 |
| Grave ciment – grave laitier | 1.50 |
| Sable ciment | 1.00 à 1.20 |
| Grave concassée ou gravier | 1.00 |
| Grave roulée – grave sableuse – T.V.O | 0.75 |
| Sable | 0.50 |
| Tuf | 0.60 |

**Tableau I.1:** Coefficient d'équivalence

## 2. Méthode A.A.S.H.O:

Cette méthode empirique est basée sur des observations du comportement, sous trafic des chaussées réelles ou expérimentales.
Chaque section reçoit l'application d'environ un million des charges roulantes qui permet de préciser les différents facteurs :

- L'Etat de la chaussée et l'évolution de son comportement dans le temps.
- L'équivalence entre les différentes couches de matériaux.
- L'équivalence entre les différents types de charge par essai.
- L'influence des charges et de leur répétition. [4]

## 3. Méthode du catalogue des structures:

Catalogue des structures type neuf est établi par «SETRA» Il distingue les structures de chaussées suivant les matériaux employés : (GNT, SL, GC, SB).
Il considère également quatre classes de trafic selon leur importance, allant de 200 à 1500 Véh/J.
Il tient compte des caractéristiques géotechniques du sol de fondation.
Il se présente sous la forme d'un jeu de fiches classées en deux paramètres de données :

- Trafic cumule de poids lourds à la 20$^{éme}$année Tj.
- Les caractéristiques de sol (Sj).

| Classe de trafic | Trafic poids lourds cumule sur 20 ans |
|---|---|
| T1 | $T < 7{,}3.10^5$ |
| T2 | $7{,}3.10^5 < T < 2.10^5$ |
| T3 | $2.10^6 < T < 7{,}3.10^6$ |
| T4 | $7{,}3.10^6 < T < 4.10^7$ |
| T5 | $T > 4.10^7$ |

**Tableau I.2:** Classes de trafic (catalogue de dimensionnement des chaussées neuves)

- Le trafic cumulé est donné par la formule suivante :

$$\mathbf{Te = Tpl\ [1+ (1+Z)^{n+1} / Z] . 365}$$

Où :
Tpl : Trafic poids lourds à l'année de mise en service.
Z : Taux d'accroissement annuel. [5]

| Classe de sol | Indice C.B.R |
|---|---|
| S1 | 25-40 |
| S2 | 10-25 |
| S3 | 05-10 |
| S4 | <05 |

**Tableau I.3:** Classe de sol (catalogue de dimensionnement des chaussées neuves)

## 4. Méthode LCPC (laboratoire central des ponts et chaussées):

Cette méthode est dérivée des essais A.A.S.H.O, elle est basée sur la détermination du trafic équivalent donnée par l'expression :

$$Teq = [TJMA.\ a\ [(1+Z)^n - 1]\ .\ 0{,}75.\ P.\ 365] / [(1+Z) - 1]$$

Où :
Teq = Trafic équivalent par essieu de 13t.
TJMA = Trafic à la mise en service de la route.
a = Coefficient qui dépend du nombre de voies.
Z = Taux d'accroissement annuel.
n = Durée de vie de la route.
p = Pourcentage de poids lourds.

Une fois la valeur du trafic équivalent est déterminée, on cherche la valeur de l'épaisseur équivalente à partir de l'abaque L.C.P.C.

L'abaque L.C.P.C est découpé en un certain nombre de zones pour lesquelles, il est recommandé en fonction de la nature et la qualité de la couche de base. [5]

## 5. Méthode du catalogue des structures algérien:

Cette méthode découle du règlement algérien en B60 – B61, et elle consiste à déterminer la classe du trafic des poids lourds à la 20$^{éme}$ année et de la classification du sol support. Une grille combinant ces deux paramètres permet au projecteur de trouver le type de chaussée qu'il dérive suivant la disponibilité des matériaux aux environs. [2]

## 6. Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP):

L'utilisation de catalogue de dimensionnement fait appel aux mêmes paramètres utilisés dans les autres méthodes de dimensionnement de chaussées : trafic, matériaux, sol support et environnement.
Ces paramètres constituent souvent des données d'entrée pour le dimensionnement, en fonction de cela on aboutit au choix d'une structure de chaussée donnée.
La Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves est une méthode Rationnelles qui se base sur deux approches :

- Approche théorique.
- Approche empirique. [6]

## I.6. Les dégradations des chaussées:

Les chaussées évoluent et se dégradent essentiellement sous l'effet du trafic lourd et des conditions climatiques. La rapidité de cette évolution et les désordres qui apparaissent sont également liées à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés et à leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre.
Les dégradations des chaussées, selon le catalogue des dégradations de surface des chaussées du [LCPC, 1998], peuvent être divisées en quatre familles : les arrachements et les mouvements de matériaux, les dégradations de déformations, les fissures. [7]

## I.6.1. Les dégradations de déformations:

## 1. Ornière à grand rayon:

**Définition:**

Déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est supérieure à 80cm.
Elle peut concerner l'une ou les deux bandes de roulement.

**Causes probables:**

• Sous-dirnensionnement ou mauvaise qualité de l'assise entraînant des contraintes verticales excessives à la surface du sol support et/ou des couches non traitées.
• Réduction de portance du support par défaut de drainage ou conséquences du dégel.

**Évolution prévisible et dégradations associées:**

Approfondissement de l'ornière accompagné de fissuration longitudinale et de faïençage.

**Paramètres influençant l'évolution:**

• Trafic lourd

• Climat : pluviométrie et dégel sans pose de barrières, associés à la perméabilité des couches de surface et au drainage. [7]



**Figure I.5:** Ornière à grand rayon [7]

## 2. Affaissement de rive:

**Définition:**

Enfoncement prononcé localisé la partie de la chaussée comprise entre le bord et la bande de roulement de rive.

**Causes probables:**

• Sous-dimensionnement localisé, lié à une hétérogénéité au niveau de l'assise (éventuellement consécutif à une pollution latérale) ou du sol support.

• Absence, mauvaise qualité ou sous-dimensionnement de l'épaulement qui peut être aggravé par des conditions géométriques particulières (intérieur de virages à petit rayon).

• Drainage ou assainissement localement défectueux.

• Retrait hydrique du sol support sous l'effet du climat et de la végétation.

**Évolution prévisible et dégradations associées:**

Approfondissement de l'affaissement accompagné de faïençage a mailles fines. Apparition éventuelle d'une fissure d'adaptation (tassement d'épaulement ou de sol support).

**Paramètres influençant l'évolution:**

• Effets dynamiques du trafic lourd.

• Climat : pluviométrie et dégel, sans pose de barrières, associés à la perméabilité des couches de surface et au drainage. [7]




**Figure I.6:** Affaissement de rive [7]

## 3. Affaissement hors rive (ou flache):

**Définition:**

Enfoncement ponctuel, prononcé, localisé à gauche ou dans la bande de roulement de rive. L'affaissement hors rive prend le nom de ''flache'' lorsqu'il a une forme circulaire.

**Causes probables:**

Sous-dimensionnement localisé lié soit à une hétérogénéité de l'assise ou du sol support, soit à la présence d'eau consécutive à la perméabilité des couches supérieures (faible compacité ou fissuration).

**Évolution prévisible et dégradations associées:**

Approfondissement de l'affaissement accompagné d'une fissure d'adaptation et de faïençage à mailles fines.

**Paramètres influençant l'évolution:**

• Effets dynamiques du trafic lourd.

• Effets du climat: pluviométrie et dégel sans pose de barrières, associés à la perméabilité du revêtement ou à un défaut de drainage localisé. [7]




**Figure I.7:** Affaissement hors rive (ou flache) [7]

## 4. Tôle ondulée:

**Définition:**

Ondulation régulière et rapprochée perpendiculaire à l'axe de la chaussée.

**Causes probables:**

• Action du trafic sur des couches instables et peu homogènes.
• Défaut de guidage du finisseur lors de la mise en œuvre de la couche de surface.
• Difficulté de compactage d'une forte épaisseur bitumineuse.

• Instabilité de la couverture bitumineuse due à de trop fortes teneurs en bitume, des bitumes trop mous ou une densité insuffisante.
• Zones fortement sollicitées par les effets tangentiels du trafic; fortes rampes avec trafic lourd; zones de freinage et d'accélération.

**Évolution prévisible et dégradations associées:**

Les vagues créées par la déformation d'une ou plusieurs couches sous les sollicitations horizontales évoluent avec des amplitudes et des fréquences croissantes.

**Paramètres influençant l'évolution:**

• Agressivité du trafic lourd.
• Importance des rampes. [7]

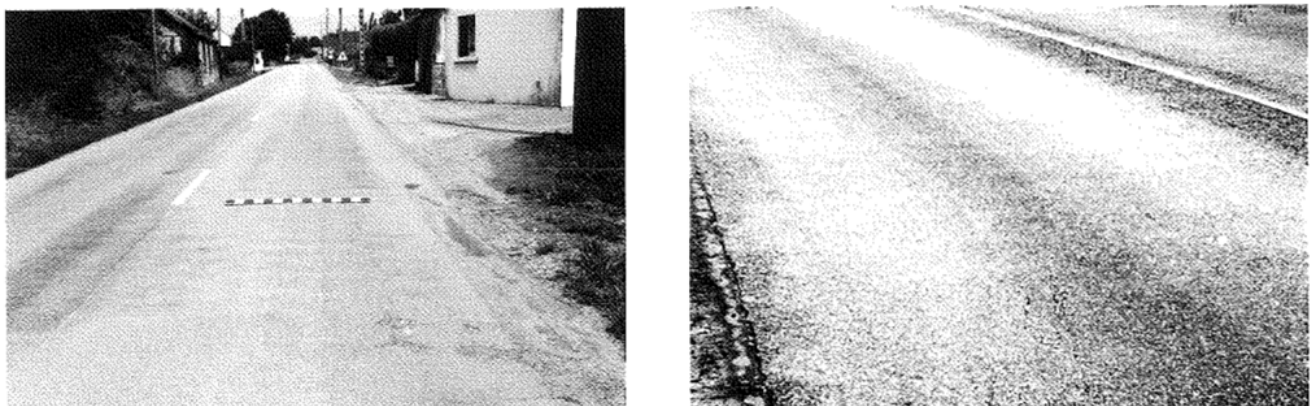


**Figure I.8:** Tôle ondulée [7]

## I.6.2. Les fissures:

## 1. Fissure longitudinale dans les bandes de roulement:

**Définition:**

Fissure sensiblement parallèle à l'axe de la chaussée apparaissant exclusivement dans une barde de roulement.

**Causes probables:**
Fatigue de la structure par excès de contrainte à la base de la ou des couches traitées ayant pour origine un Sous-dimensionnement ou un décollement entre couches.

**Évolution prévisible et dégradations associées:**
• Ramification et dédoublement de la fissure avec ouverture des lèvres liée au départ de matériaux en bord de fissure.
• Évolution possible vers du faïençage à mailles fines puis de l'ornière à grand rayon et des nids de poule lorsque les fissures sont dues à une résistance insuffisante des matériaux d'assise.

**Paramètres influençant l'évolution:**
• Trafic lourd.
• Effets climatiques (surtout pluviométrie et gel-dégel).
• Qualité, épaisseur, formulation des matériaux bitumineux.
• Sensibilité à l'eau des matériaux et sols non traités.
• Qualité et accrochage des couches. [7]



**Figure I.9:** Fissure longitudinale dans les bandes de roulement [7]

## 2. Fissure longitudinale non spécifique aux bandes de roulement:

**Définition:**
Fissure sensiblement parallèle l'axe de la chaussée non limitée aux bandes de roulement.

**Causes probables:**
• Réapparition d'un joint de mise en œuvre ou d'une fissure longitudinale grave dans les couches inférieures.
• Gonflement différentiel dû au gel.
• Cf. Couches de roulement en béton bitumineux.

**Évolution prévisible et dégradations associées:**
Épaufrure des bords de fissure qui favorise la pénétration de l'eau, ramification de la fissure puis faïençage.

**Paramètres influençant l'évolution:**

• Effets dynamiques du trafic lourd.
• Pluviométrie et conditions de drainage
• Qualité des matériaux bitumineux. [7]



**Figure I.10:** Fissure longitudinale non spécifique aux bandes de roulement [7]

## 3. Fissure d'adaptation:

**Définition:**

Fissure provenant de mouvements de sol : tassement d'élargissement ou d'épaulement, retrait hydrique, glissement de remblai, etc.

**Causes probables:**

• Glissement de terrain. (a)
• Tassement de remblai (instabilité). (b)
• Tassement d'élargissement (support sous compacté ou structure sous-dimensionnée). (c)
• Retrait hydrique du sol support (argiles, limons, marnes) consécutif à la sécheresse, à un drainage postérieur à la réalisation et/ou aux plantations. (d)

**Évolution prévisible et dégradations associées:**

• Ouverture et épaufrure, puis décalage des lèvres.
• Fissures consécutives à des tassements d'élargissements : dédoublement, ramification, faïençage.

**Paramètres influençant l'évolution:**

• Trafic lourd - pour les tassements d'élargissement (a, b, c, d).
• Climat - sécheresse et fortes pluies (d).
• Étanchéification des fissures trop tardive (a, b, c, d).
• Drainage inadapté, trop brutal ou postérieur aux travaux (a, b, c, d).
• Pente, nature et qualité de réalisation du remblai (b). [7]



**Figure I.11:** Fissure d'adaptation [7]

## 4. faïençage dans les bandes de roulement:

**Définition:**

Ensemble de fissures entrelacées ou maillées (mailles fines inférieures à 30 cm), formant une série de polygones et localisées dar les bandes de roulement**.**

**Causes probables:**

• Fatigue excessive de l'assise provoquée par un excès de contrainte de traction par flexion à la base de la ou des couches traitées. (a)
• Décollement de la couche de roulement. (b)

**Évolution prévisible et dégradations associées:**

• Le réseau de mailles se resserre et évolue vers le départ de matériaux et la formation de nids de poule ou de pelade en présence de couches de roulement minces.
• Le faïençage favorise l'entrée d'eau de ruissellement dans le corps de chaussée qui entraîne une chute de portance à l'origine de déformations (ornière à grand rayon, affaissement de rive et hors rive).
• Déformations et faïençages s'aggravent mutuellement.

**Paramètres influençant l’évolution:**

• Trafic lourd (a).
• Conditions climatiques - gradients thermiques et pluviométrie (a et b).
• Qualité et épaisseur des matériaux bitumineux (b).
• Absence ou sous-dosage de la couche d'accrochage (b).
• Absence d'étanchéité, sous-dimensionnement (a).
• Actions de l'eau et du gel (a et b). [7]



**Figure I.12:** Faïençage dans les bandes de roulement [7]

## I.6.3. Les arrachements:

## 1. Tête de chat:

**Définition:**

Pierre dure apparaissant la surface de la chaussée après usure de la couche de roulement.

**Causes probables:**

Qualité et épaisseur de la couche de roulement inadaptées au trafic lourd.

**Évolution prévisible et dégradations associées:**

• Aggravation et extension des surfaces concernées.
• Formation de nids de poule de niveau de gravité élevé.

**Paramètres influençant l'évolution:**

• Agressivité du trafic lourd.
• Pluviométrie.
• Formulation de la couche de roulement. [7]

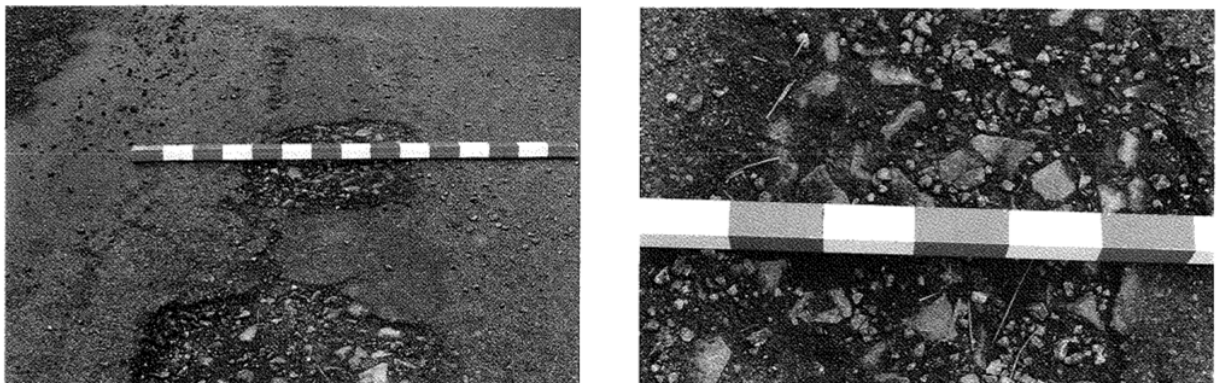


**Figure I.13:** Tête de chat [7]

## 2. Nid de poule:

**Définition:**

Cavité circulaire créée à la surface de la chaussée par des départs de matériaux.

**Causes probables:**

• Évolution par départ de matériaux d'une fissure, d'un faïençage ou d'un désenrobage.
• Départ d'un corps étranger dans la couche de roulement (bois, matériau altéré, argile).
• Réparations réalisées dans de mauvaises conditions ou avec des matériaux inadaptés.

**Évolution prévisible et dégradations associées:**

• Agrandissement de la cavité en diamètre et en profondeur.
• Dégradation souvent associée à du faïençage sur les bandes de roulement spécifiques aux assises traitées aux liants hydrauliques.

**Paramètres influençant l'évolution:**

• Trafic.
• Conditions climatiques (pluviométrie, gel et dégel).
• Perméabilité et épaisseur de la couche de roulement. [7]

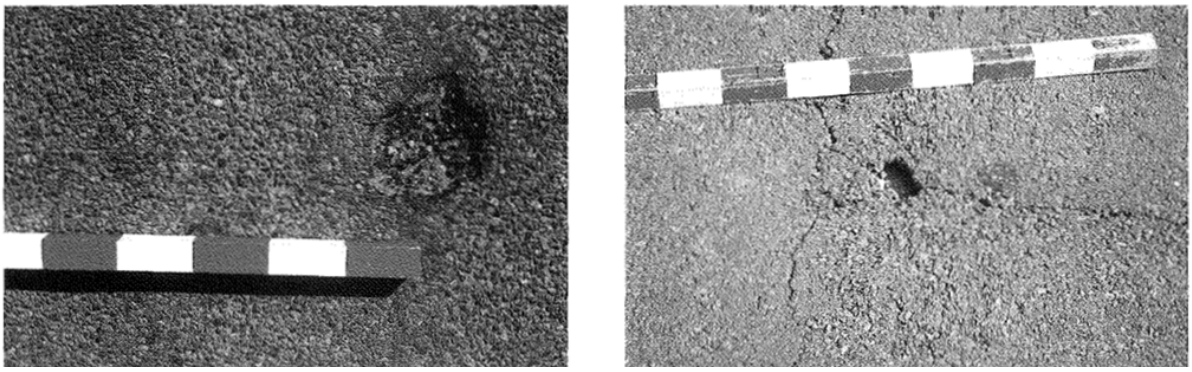


**Figure I.14:** Nid de poule [7]

## I.6.4. Les mouvements de matériaux:

## 1. Remontée de fines:

**Définition:**

Apparition d'éléments fins a la surface de la chaussée provenant de l'assise ; ces remontées sont généralement localisées au droit de défauts de la couche de roulement (fissure, faïençage, flache etc...)

**Causes probables:**

• Mouvement vers la surface de particules fines entraînées par l'eau circulant dans l'assise sous l'effet du pompage engendré par le trafic.

• Ces particules proviennent :

a) du sol support (cas des sols fins sensibles à l'eau) ;
b) de l'attrition des matériaux d'assise hydraulique ; ce phénomène peut se produire sur des fissures présentant des battements ou sur des zones dont l'assise présente un feuilletage, une décohésion superficielle ou une décohésion dans la masse.

**Évolution prévisible et dégradations associées:**

• Extension des surfaces concernées.
• Les remontées de fines sont associées aux fissures transversales et longitudinales et au faïençage.

**Paramètres influençant l'évolution:**

• Agressivité du trafic lourd.
• Pluviométrie et conditions de drainage.
• Faible dureté des matériaux (granulats).
• Feuilletage, décohésion superficielle ou dans la masse de l'assise hydraulique.
• Épaisseur et perméabilité de la couche de roulement. [7]

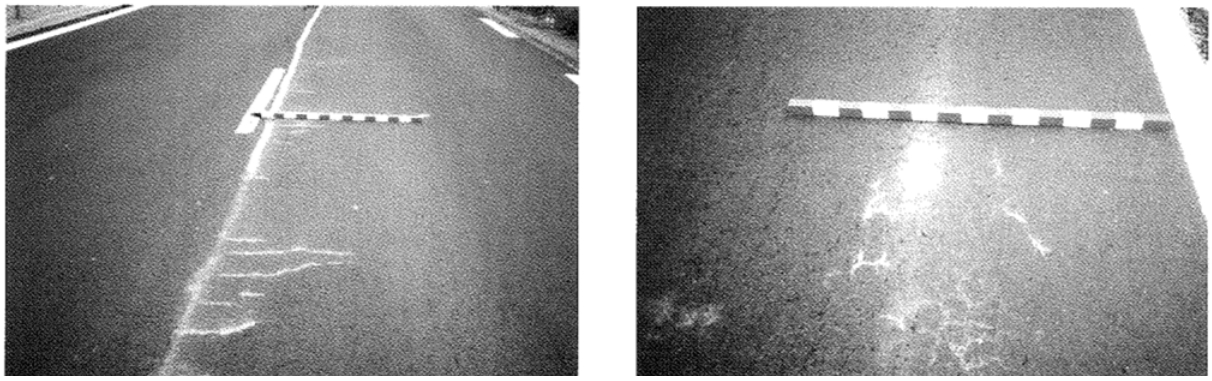


**Figure I.15:** Remontée de fines [7]

## I.6.5. Phénomène de gonflement:

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous sol. Il peut être attribue au climat et a la surcharge. Les désordres subits par la chaussée se résument généralement à les fissures apparaissent a la fin de la saison sèche sur les accotements de la chaussée, en saison de pluie ces fissures permettent a l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée (Figure I.16 ; I.17) puit l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords, ces phénomènes sont accélères par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche (Figure I.18). [7]

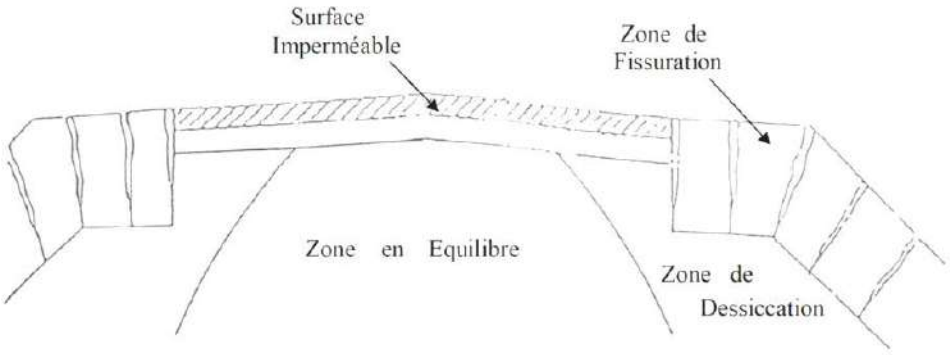



**Figure II.16:** Apparition des premières fissures sur les accotements (fin de saison sèche) [7]

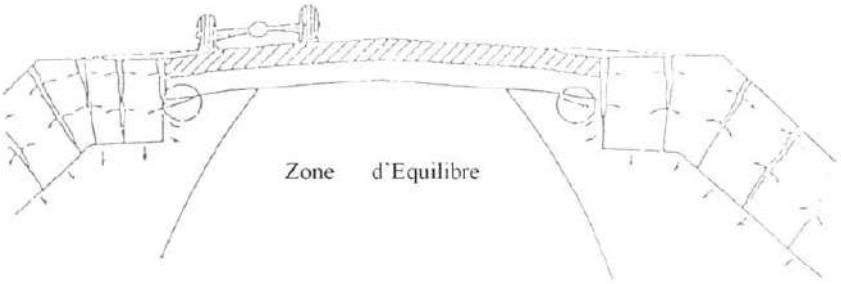



**Figure II.17:** Apparition des premières déformations et infiltration d'eau à travers les fissures (début de la saison des pluies) [7]

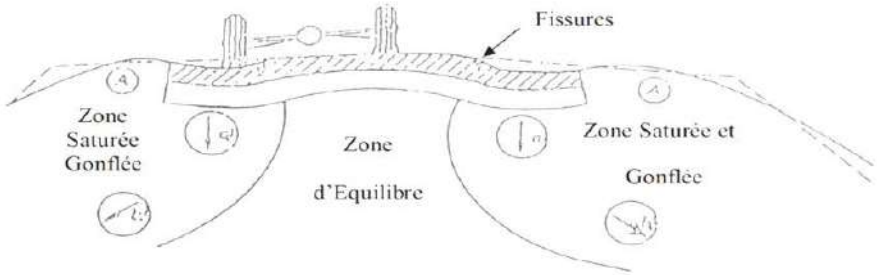



**Figure II.18:** chute de portance des zones saturées apparition des fissures longitudinales (fin de saison des pluies) [7]

## I.7. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons passé en revue la bibliographie concernant les chaussés et les désordres dans les ouvrages routières, les dégâts produit à chaque années à travers le monde ont été évalué en cet mille millions de dollars, on dépose des déférents solutions parmi lesquelles : le renforcement de corps de chaussées par géotextile, cette technique à été largement utilisé dans la construction routières, car la chaussée devra résister aux agressions des agents extérieurs et à la surcharge d'exploitation: action des essieux des véhicules et notamment les poids 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.

# CHAPITRE II

## NOTION SUR LES GEOSYNTHETIQUE

## II.1. Introduction:

Depuis le début des années 70, les géosynthétique sont utilises de plus en plus dans les infrastructures et les ouvrages en terre. Au début, on les utilisait comme éléments de drainage et comme couches de protection pour les voies ferrées, dans des fonctions de filtration et de séparation, mais on a développé par la suite des géosynthétique pour protéger, renforcé et étanchéifier la fondation de la voie.

De part leurs propriétés physicochimiques, leurs performances mécaniques combinées a leur faible coût de production, les géosynthétique permettent de proposer des variantes techniques intéressantes dans le domaine des travaux publics. Un des grands champs d'application des géosynthétique est le domaine routier. L'emploi de ces matériaux dans les ouvrages de construction routière constitue une perspective intéressante face à la pénurie des bons matériaux de construction et aux problèmes que posent leur exploitation et leur transport, l'utilisation des géosynthétique peut constituer une solution intéressante dans la construction de routes économiques. Ce chapitre d'étude présente une notion élémentaire sur les géosynthétique ainsi que les techniques de renforcement des matériaux de chaussées par incorporation des géosynthétique.

## II.2. Définition:

Un géosynthétique est un produit dont au moins un des constituants est à base de polymère synthétique (polyéthylène, polyamide, polyester ou polypropylène, par exemple) ou naturel. Il se présente sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle. Il est utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

Les ouvrages dans lesquels les géosynthétiques sont utilisés sont multiples : infrastructures linéaires de transport (routes, voies ferrées), ouvrages hydrauliques (barrages, bassins, canaux), ouvrages pour la protection de l'environnement (installations de stockage de déchets, stockage de déchets miniers, sites et sols pollués), bâtiments. La figure (II.1) présente l'utilisation de géotextile dans une chaussée routière. [8]



**Figure II.1 :** Misse en œuvre du géotextile dans une chaussé routière [35]

## II.3. Différents type de géosynthétiques:

Les géosynthétiques sont généralement répartis en deux grandes familles :

1. les géotextiles et produits apparentés aux géotextiles qui sont des produits perméables ;
2. les géo membranes et les géosynthétiques bentonitiques qui sont essentiellement imperméables.

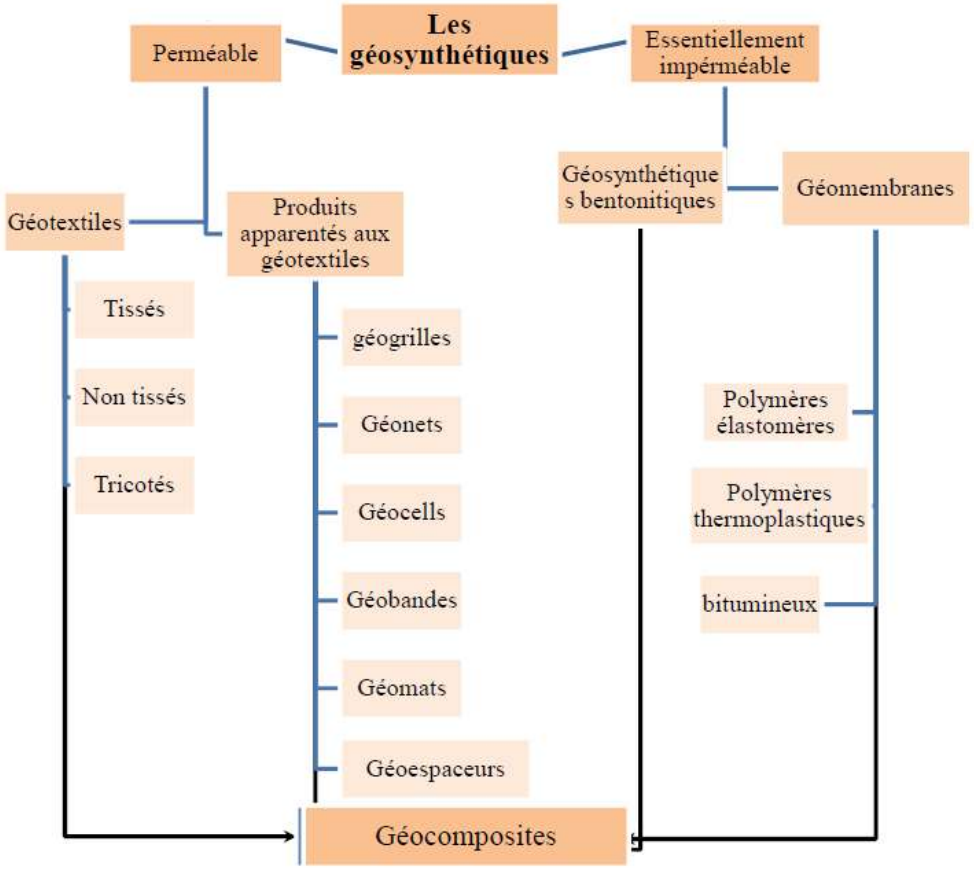



**Figure II.2:** Déférent type de géosynthétique [36]

## II.3.1. Produits perméables:

### II.3.1.1. Géotextile:

Un géotextile est défini comme une matière textile plane, perméable et à base de polymère (naturel ou synthétique), pouvant être non tissée, tissée ou tricotée, utilisée en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans le domaine de la géotechnique et du génie civil. [8]

- **Les géotextiles non-tissés:**

Les géotextiles non-tissés (voir figure II.3) représentent la plus importante part du marché. On Retrouve principalement trois procédés de fabrication distincts:

- Les non-tissés voie sèche aiguilletés,
- Les non-tissés «spun» aiguilletés,
- Les-non-tissés «spun» thermo liés.

À l'inverse des produits issus des autres procédés de fabrication présentés plus loin, les technologies des non-tissés utilisent des fibres ou filaments individualisés et visent des produits présentant un comportement uniforme quelle que soit la direction du plan choisie. Les premiers sont constitués des fibres de longueur finie (de 75 à 150mm) présentant une frisure (crimp). Ces fibres individualisées sont assemblées par cardage sous la forme de voiles très légers (de l'ordre de 10 à 30g/m²) dont la cohésion est assurée par la présence des frisures des fibres. Plusieurs couches de voiles ont alors superposées par nappage pour former une nappe de masse surfacique désirée.

La consolidation par aiguilleté âge repose alors sur la création d'un enchevêtrement des fibres au moyen de nombreuses pénétrations d'aiguilles munies de barbes, En gendrant une cohésion par friction inter fibres. La densité de pénétration des aiguilles est de l'ordre de 300 à 600 coups par cm².

Dans le cas des non-tissés «spun» aiguilletés, le même procédé d'aiguilletage expliqué précédemment est employé. Il est possible d'énumèrerons certain nombre de caractères des différents types de non tissés. Ainsi, en règle générale, les non-tissés «spun» thermo liés présentent une porosité relative ment faible (60 à 70%) qui peut réduire la mouillabilité du produit notamment lorsqu'il est constitué de filaments de polypropylène.

Des manufacturiers incluent des additifs chimiques pour remédiera ce problème mais ils sont souvent les sivables. En contrepartie, la technologie des non-tissés «spun» thermo lié sperm et d'obtenir des non-tissés de très faible masse surfacique qui peuvent être utilisés de façon satisfaisante à titre d'agro textiles.

Les non tissés aiguilletés présentent une porosité plus élevée, de 85 à 95% à moins qu'un traitement ultérieur de calandrage n'ait été réalisé. [9]

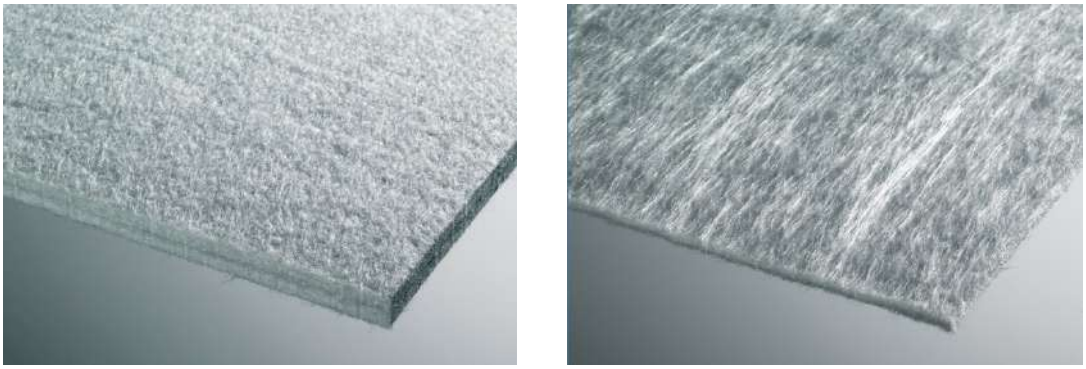


**Figure II.3:** Échantillons de géotextiles non-tissés [35]

- **Les géotextiles tissés:**

À l'opposé des non-tissés qui sont composés de fibres, les géotextiles tissés (voir figure II.4) sont constitués de fils qui peuvent être de différents types : mono filament, fils multi Filamentaires, fils de fibres courtes, bandelettes, ces fils sont entre croisés dans le plan dans deux directions perpendiculaires, le sens machine (chaîne) et le sens travers (Trame), selon un patron donné (nombre de fils par cm, armure ou type d'entrecroisement) pour former une étoffe très anisotrope.

En règle générale, on retrouve les mêmes types de polymère que dans le cas des non-tissés, quoi que d'autres matériaux tels que les filaments de verre, soient utilisés pour des applications spécifiques.

Il existe une grande variété de métiers à tisser, ce pendant il est possible de classifier les produits qui en découlent en deux grandes classes. Les tissus conventionnels et les tissus à étoffes multiples. Les seconds, plus difficiles à mettre en œuvre, permettent l'obtention de produits très variés de type tridimensionnel, pouvant répondre à des applications très spécifiques.

Un des caractères spécifiques du géotextile tissé est sans aucun doute ses propriétés mécaniques. Elles sont en effet très différentes de celles des non-tissés. Il faut comprendre quelles fils utilisés forment finalement dans l'étoffe deux nappes très fortement orientées selon le sens machine et le sens travers. Cette caractéristique est très appréciée notamment pour les applications de renforcement.

Né an moins, il ne s'agit pas là du seul champ d'application des géotextiles tissés. Ils sont couramment utilisés à titre de filtre ou de séparateur. Ce pendant, alors quelles non tissés présentent des granulométries de pores relativement étalées, les tissus ont des granulométries beaucoup plus uniformes, parfois multimodales. Les tissés étant beaucoup plus denses que les non-tissés, il est important de tenir compte de leur pourcentage d'ouverture qui donne une image de la quantité de pores disponibles. Mentionnons quels tissus sont très adapté salarié alisation de géotextiles présentant de couvertures de filtration élevées (>500m). [9]

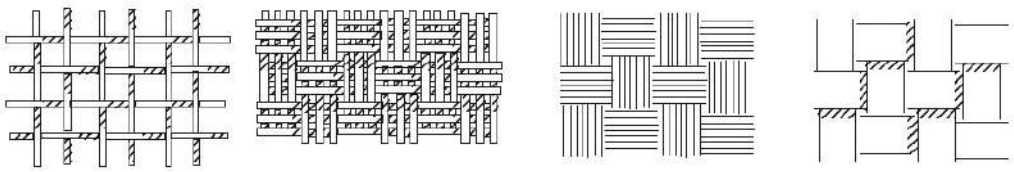


**Figure II.4:** Les tissés de fils monofilaments, multifilaments et les tissés de bandelettes [37]

- **Les géotextiles tricotés:**

Traditionnellement, les géotextiles tricotés étaient uniquement ceux utilisés à la façon de bas, autour des tuyaux de drainage. Les tricots trames issus des tricoteuses circulaires semblent en effet appropriés a ce type d'application. Par contre, depuis plusieurs années et suite au développement de nouveaux métiers dits tricoteuses chaines et la possibilité d'insérer des trames au sein des tricots, plusieurs manufacturiers ont développé une nouvelle famille de géotextiles tricotés pour diverses applications tels le renforcement et le contrôle de l'érosion.

Comme dans le cas des tissus, le matériau de base des tricots est le fil. Les fils sont entre lacés selon un patron donné.
Les géotextiles tubulaires de type tricots trames sont très déformables du fait de la possibilité laissée aux fils formant les mailles de glisser le sans par rapport aux autres.
En ce qui concerne les géotextiles de type tricots chaine severin section de trames, ils consistent en faite en l'assemblage, ardes fils déliage, de nappes de fils très fortement orientés selon les directions machine et travers. Cette orientation permet d'atteindre des propriétés mécaniques en traction et notamment des modules d'élasticité corê plus élevées que dans le cas des matériaux tissés. [9]

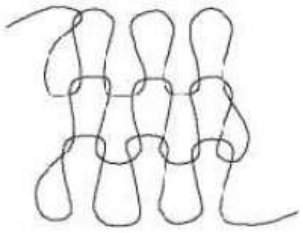


**Figure II.5:** Exemple de tricoté démaillable [37]

### II.3.1.2. Produits apparentés aux géotextiles:

- **Géogrille:**

Une géogrille est définie comme une structure plane à base de polymère constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entrelacement (Figure II.6**)**. Les ouvertures des géogrilles ont des dimensions supérieures à celles des constituants. [8]



**Figure II.6:** Échantillons de géogrilles [35]

- **Géocomposite:**

Un géocomposite est un produit issu de la combinaison industrielle de deux ou plusieurs géosynthétique. La figure au dessous présente un Échantillons de géocomposite. [8]

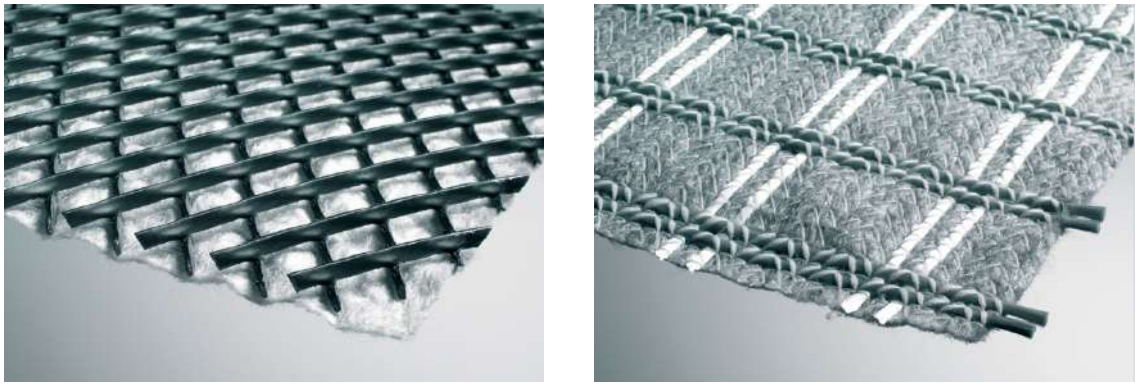


**Figure II.7:** Échantillons de géocomposite [35]

- **Géobande:**

Une géobande est définie comme un matériau à base de polymère, qui se présente sous la forme de bandes dont la largeur n'excède pas 200 mm. Elle est utilisée en contact avec le sol et/ou d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. [8]

## II.3.2. Produits imperméables:

- **Géosynthétique bentonitique :**

Un géosynthétique bentonitique (GSB) est défini comme un produit manufacturé en forme de nappe, constitué d'un assemblage de matériaux comportant au moins de la bentonite, en poudre ou en granulés (Figure II.8), celle-ci assurant la fonction étanchéité, et d'un ou plusieurs géosynthétiques utilisés comme supports ou conteneurs. Il est utilisé dans le domaine de la géotechnique et du génie civil. [8]



**Figure II.8:** Échantillons de géosynthétique bentonitique (GSB) [35]

- **Géomembrane :**

Une géomembrane est définie comme un produit manufacturé adapté au génie civil, se présentant sous la forme de lés, d'une largeur minimale de 1,50 m. Mince, souple, continue et étanche aux fluides à la sortie de la chaîne de fabrication, elle présente une épaisseur effective de 1 mm minimum sur toute la surface du lé. Elle est soudable en continu, quelles que soient les faces des lés en contact, par soudure

thermique, par vulcanisation ou par bandes adhésives autocollantes selon la nature du produit. Les matériaux d'épaisseur inférieure au millimètre sont appelés « géofilms ». La figure (II.9) présente un échantillon de géomembrane. [8]



**Figure II.9:** Échantillons de géomembrane [35]

## II.4. Fonctions des géosynthétique:

1. **La séparation** : prévention du mélange de deux sols ou de matériaux de remblais adjacents de natures différentes ;

2. **La filtration** : rétention du sol, ou d'autres particules soumises à des forces hydrodynamiques, tout en permettant le passage de fluides à travers ou dans un géotextile, ou un produit apparenté aux géotextiles. Le géotextile permet de créer un autofiltre dans le sol en amont ;

3. **Le drainage** : collecte et transport des eaux, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles ;

4. **Le renforcement** : utilisation du comportement en traction-déformation d'un géotextile ou d'un produit apparenté, afin d'améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction ;

5. **La protection** : prévention ou limitation des endommagements localisés d'un élément ou d'un matériau donné, en utilisant un géotextile ou un produit apparenté ;

6. **La lutte contre l'érosion de surface** : utilisation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles, afin d'éviter ou de limiter les mouvements du sol ou d'autres particules à la surface.[8]

La figure **(**II.10) résume les principales fonctions des géosynthétiques :

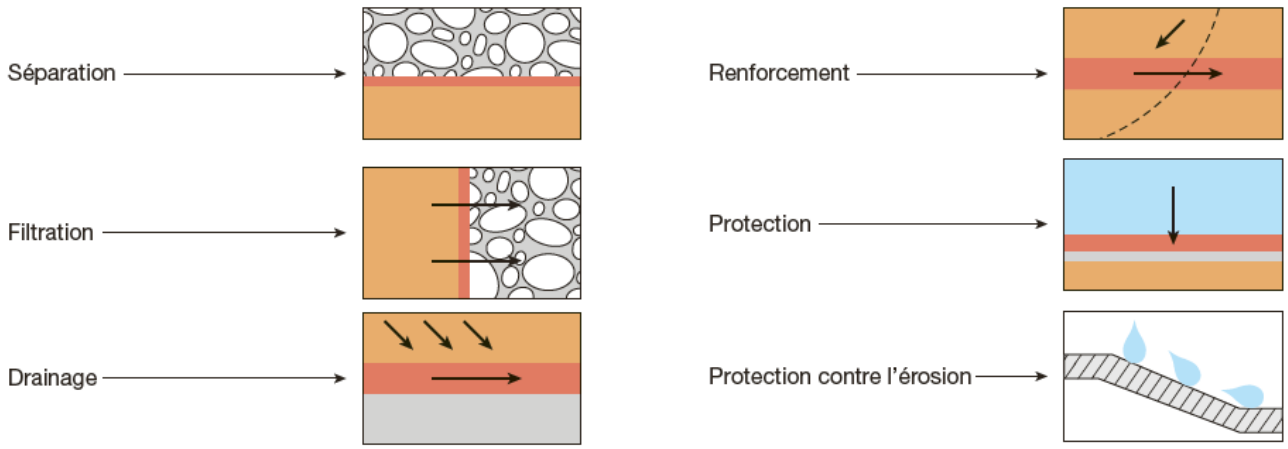



**Figure II.10:** Principales fonctions des géosynthétique [8]

## II.5. Techniques de disposition des géosynthétique:

La gamme de géosynthétique disponibles pour le projeteur lors de son étude est vaste. A l'intérieur de celle-ci, on peut définir trois grandes familles de produits en fonction de leur géométrie (Figure II.11) :

- **Uni dimensionnel**, qui se présente sous forme de fils, tube ;
- **Bi dimensionnel**, qui constitue une nappe. On trouve principalement des géotextiles tisses, non tisses, tricotes composes de fibres et les géogrilles ;
- **Tri dimensionnel**, qui contient du sol ou un matériau. Deux types de structures tridimensionnelles existent actuellement les structures alvéolaires et les structures sous forme de grilles triangulaires.



Structure Unidimensionnelle



Structure Bidimensionnelle



Structure Tridimensionnelle

**Figure II.11:** Structures de disposition des géosynthétique [37]

Le nombre de dimensions du géosynthétique ne correspond pas forcement au nombre de dimensions présentes dans l'ouvrage étudié. En fait, plus le nombre de dimension du géosynthétique est grand plus celui-ci sera apte a traiter le problème en profondeur.
Par exemple, a un problème plan de protection d'une pente contre l'érosion de surface, on peut répondre par un géosynthétique tridimensionnel.
La difficulté pour la mise au point de la méthodologie proposée est que certains géosynthétique possèdent des caractéristiques bidimensionnelles et tridimensionnelles suivant l'échelle a laquelle on se place et qu'il est par ailleurs possible de réaliser de nombreux combinaisons pour créer des complexes cumulant des caractéristiques des géosynthétique le composant (par exemple, fermer les cellules d'un géoconteneur avec des nappes géosynthétique pour réaliser un géomatelas). [9]

## II.6. Mécanismes de renforcement:

Le but de ce paragraphe est de décrire l'état des connaissances concernant les mécanismes par lesquels les géosynthétiques fournissent le renforcement de la couche de base (ou couche de fondation) des chaussées souples.
Le renforcement des chaussées par des géosynthétiques ce fait à travers trois mécanismes connus à ce jour et qui sont :
- Mécanisme de confinement (autoblocage) latéral de la couche de base ;
- Mécanisme de surface de rupture par cisaillement modifiée ;
- Mécanisme de membrane tendue. [10]

### II.6.1. Mécanisme de confinement (autoblocage) latéral de la couche de base:

Le mécanisme principal de renforcement attribué aux géosynthétique (notamment les géogrilles) dans les routes revêtues ou non revêtues s'appelle généralement confinement ou autoblocage latéral de la couche de base.

Le phénomène de confinement s'explique par le fait que le matériau de l'agrégat de couche de base interagit avec la géogrille principalement en s'imbriquant dans les ouvertures de la géogrille. Les nervures de la géogrille confinent l'agrégat et résistent au mouvement latéral de l'agrégat quand la couche de base est chargée en surface. En retenant latéralement le sol, quatre mécanismes de renforcement sont potentiellement réalisés, comme représentés sur la (figure II.12). Ces mécanismes incluent :

1. Empêchement de l'étalement latéral de l'agrégat de la couche de base ;
2. Confinement croissant et ainsi résistance croissante de la base à proximité du renforcement ;
3. Amélioration de la distribution verticale des contraintes sur le sol de fondation ; et
4. Réduction de la contrainte de cisaillement dans le sol de fondation. [10]

### II.6.1.1. Empêchement de l'étalement latéral de l'agrégat de la base:

Le mécanisme de renforcement par blocage latéral, ou l'interface de résistance au cisaillement, se développe par l'interaction de cisaillement de la couche de base avec la couche (ou des couches) du géosynthétique positionnées à l'intérieur ou au fond de la base de l'agrégat de la couche de base (figure II.12). Les charges des véhicules appliquées à la surface de la chaussée créent un mouvement d'étalement latéral de l'agrégat de la couche de base.

Des déformations latérales de tension sont créées dans la base au-dessous de la charge appliquée pendant que le matériau se déplace vers le bas et extérieurement à la charge. Le mouvement latéral de la base permet le développement des déformations verticales, menant à une ornière permanente dans le parcours de la roue. La mise en place d'une couche ou des couches de géosynthétique dans ou au dessous de la couche de base permet le développement de l'interaction de cisaillement entre l'agrégat et le géosynthétique, à mesure que la base tend de s'étaler latéralement.

La charge de cisaillement est transmise de l'agrégat de la base au géosynthétique et place le géosynthétique en tension. La rigidité relativement élevée des géosynthétiques fait retarder le développement de la déformation de tension latérale dans la base adjacente au géosynthétique. Il en résulte une déformation latérale faible et de ce fait une déformation verticale de la surface de chaussée moins importante. [10]

### II.6.1.2. Augmentation de la rigidité de l'agrégat de la couche de base:

La contrainte de cisaillement développée entre l'agrégat de la couche de base et le géosynthétique permet une augmentation de la contrainte de confinement latéral dans la base. Les matériaux granulaires montrent généralement une augmentation du module élastique avec une contrainte de confinement accrue. Le deuxième mécanisme de renforcement de la base résulte d'une augmentation de la rigidité de l'agrégat de la couche de base, quand une interaction adéquate se développe entre la base et le géosynthétique. [10]

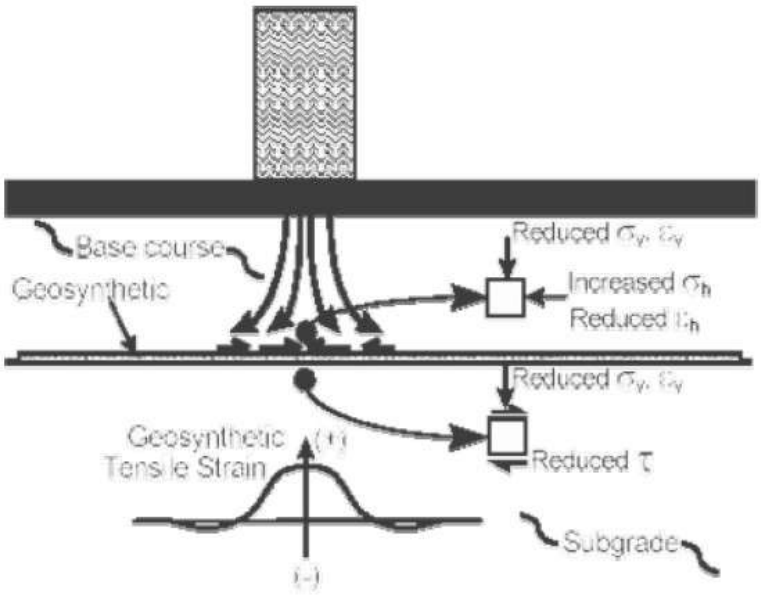



**Figure II.12:** Mécanisme de Confinement (autoblocage) latéral de la couche de base [31]

### II.6.1.3. Amélioration de la distribution verticale des contraintes sur le sol de fondation:

L'augmentation de rigidité de cette couche a comme conséquence des déformations verticales inférieures dans la base. On s'attendrait à ce qu'une augmentation du module de la base ait également comme conséquence de plus faibles déformations verticales dynamiques et réversibles de la surface de chaussée, impliquant que la fatigue de la couche de béton bitumineux pour les chaussées revêtues serait réduite. La présence d'une couche de géosynthétique dans, ou au dessous, de la base, peut également mener à un changement de l'état de contraintes et de déformation dans le sol de fondation. Pour les systèmes multicouches, où un matériau moins rigide de sol de fondation se trouve sous la base, une augmentation du module de la couche de base a comme conséquence une contrainte verticale améliorée et plus largement distribuée sur le sol de fondation. [10]

### II.6.1.4. Réduction des contraintes de cisaillement dans le sol de fondation:

Le quatrième mécanisme de renforcement résulte d'une réduction des déformations de cisaillement du sol de fondation. On s'attend à ce que la déformation de cisaillement transmise de la couche de base au sol de fondation diminue, puisque, le cisaillement de la base transmet des efforts de tension au renforcement.

Un des effets bénéfiques du renforcement par géosynthétique à l'interface entre la couche de base et le sol de fondation c'est, justement, de supporter les contraintes de cisaillement induites par les charges des véhicules à l'interface. Il est important de comprendre que les contraintes de cisaillement transmises de la couche de base au sol de fondation peuvent être orientées à l'extérieur ou vers l'intérieur. Selon un résultat classique de la théorie de plasticité, les contraintes de cisaillement centrifuges diminuent la

capacité portante du sol de fondation tandis que les contraintes de cisaillement centripètes augmentent la capacité portante du sol de fondation. Les contraintes de cisaillement induites par les charges des véhicules tendent à être orientées vers l'extérieur, ce qui diminue la capacité portante du sol de fondation, l'enchevêtrement entre la géogrille et l'agrégat de la couche de base a, notamment pour conséquence, deux effets bénéfiques:

1. le mouvement latéral de l'agrégat de la couche de base est réduit ou éliminé et, en conséquence, aucune contrainte de cisaillement centrifuge n'est transmise au sol de fondation ; et
2. la surface inférieure de la couche de base, dont l'agrégat confiné frotte à travers les ouvertures de la géogrille, fournit une surface rugueuse qui résiste au mouvement latéral du sol de fondation, ce qui génère des contraintes de cisaillement centripètes qui augmentent la capacité portante du sol de fondation. [10]

## II.6.2. Mécanisme de surface de rupture modifiée et augmentation de la capacité portante:

La figure (II.13) illustre la fonction de l'accroissement de la capacité portante. Le géosynthétique force la surface de rupture potentielle à se développer selon une surface alternative qui a une plus grande résistance totale. [10]

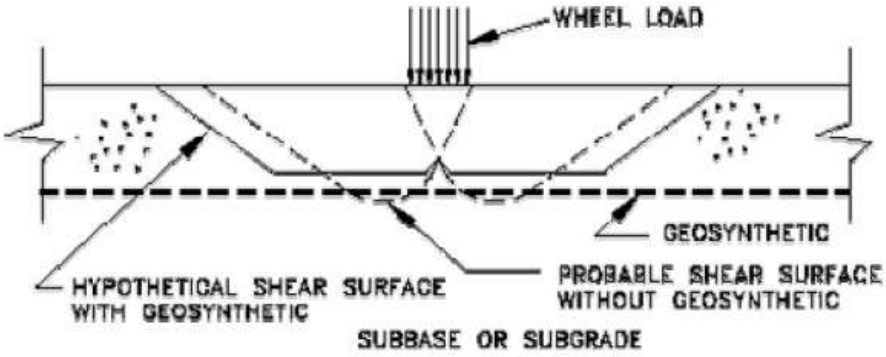



**Figure II.13:** Surface de Rupture Modifiée et Augmentation de la capacité portante [31]

## II.6.3. Mécanisme de membrane tendue:

La théorie de membrane tendue, est plus appropriée quand une ornière ou une large déformation verticale (plus grande que 25 mm) est permise. Ainsi cette théorie est appropriée aux routes non revêtues.

Des forces de tension sont installées dans le renforcement par les contraintes de cisaillement agissant à l'interface avec le sol. Pendant le chargement lourd ou répété, la couche d'agrégat déforme sensiblement, créant les ornières de surface qui forcent le géotextile à déformer, voir (figure II.14). Si les forces de tension coïncident avec une courbure appréciable du renforcement, alors les contraintes normales dans le sol agissant de part et d'autre du renforcement sont inégales.

Sous la roue, dans le creux de l'onde, la membrane tendue porte une partie de la charge de la roue et réduit la contrainte normale sur le sol de fondation. En dehors de la surface chargée, au-dessus des crêtes adjacentes de l'onde, la membrane tendue s'appuie sur le sol de fondation et augmente la contrainte normale (pression de confinement) où elle sert à résister à la rupture par cisaillement. Une membrane tendue de ce fait permet de diminuer les contraintes appliquées et d'augmenter la capacité portante. [10]

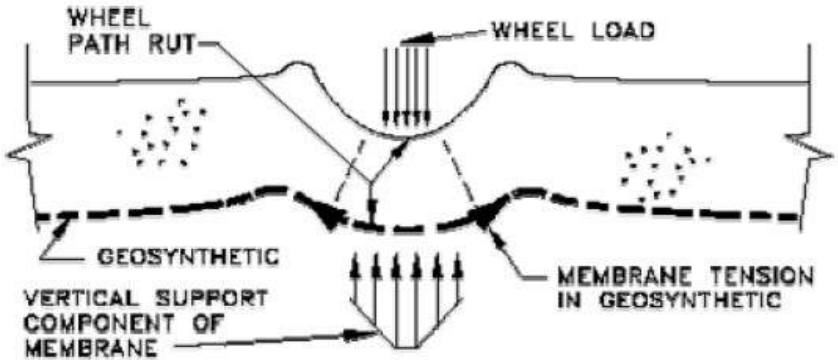



**Figure II.14:** Membrane tendue [31]

## II.7. Utilisation des géosynthétiques dans le domaine routier:

Les routes et autoroutes sont de la plus haute importance pour le développement d'un pays. Le trafic répété de véhicules lourdement charges, les conditions climatiques et les propriétés mécaniques des matériaux employés dans ces constructions peuvent entrainer une durabilité bien moindre des chaussées routières que ce qui était attendu. [11]



**Figure II.15:** Géosynthétiques dans l'ingénierie des routes [37]

Les géosynthétiques peuvent être efficacement utilises pour renforcer des routes non revêtues et des plates-formes de travail sur les sols mous. S'il est bien spécifie, un géosynthétique peut exercer une ou plusieurs des fonctions suivantes :

- Separation,
- Reinforcement,
- Drainage.

Les géotextiles et les géogrilles sont les matériaux les plus fréquemment utilises dans ce type de travaux.

**II.7.1. Apport des géosynthétiques sur le comportement mécanique des chaussées de routes:**

Comparé aux routes non renforcées, la présence des géosynthétiques peut apporter les bénéfices suivants (Figure II.16):

a. Réduction de l'épaisseur du remblai ;
b. Séparation des agrégats et du sol mou ;
c. Augmentation de la capacité portante du sol mou ;
d. Réduire ou éviter la remontée des fissures ;
e. Réduire l'épaisseur du revêtement bitumineux ;
f. Réduction de la déformation latérale du remblai ;
g. Amélioration de la distribution des contraintes (Figure II.16.a) ;
h. Réduction de la déformation verticale due à l'effet de membrane (Figure II.16.b) : A mesure que la profondeur des ornières augmente, la déformation du géosynthétique fournit d'avantage de renforcement grâce a l'effet de membrane. La composante verticale de la force de tension du renforcement réduit les incréments de déformation verticale du remblai.
i. Augmentation de la durée de vie de la chaussée (Figure II.16.c) ;
j. Augmentation de la résistance du sol : Le drainage d'un sol mou sous une chaussée peut être réalise en employant des géosynthétique types : géotextile, géogrilles ou géocomposite. Ce drainage accéléra la consolidation du sol mou, augmentant sa résistance (Figure II.16.d).
k. Réduction des couts de construction et des besoins d'entretien de la route. [11]

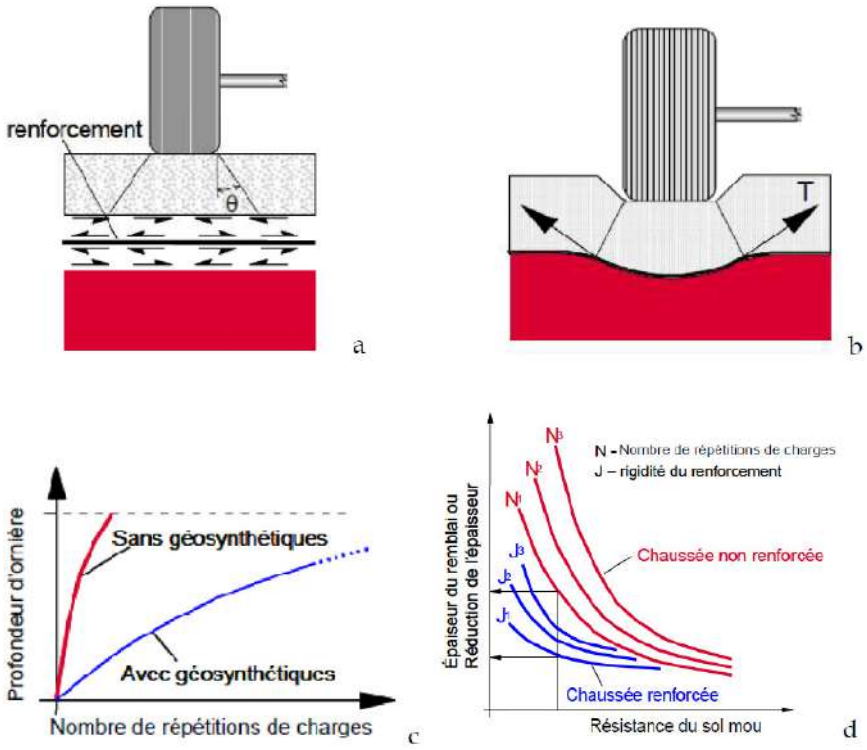



**Figure II.16:** Apport des géosynthétiques sur le comportement mécanique des chaussées de routes [37]

### II.7.2. Facteur d'efficacité (E) des géosynthétiques dans les routes:

L'efficacité des géosynthétiques comme renforcement de chaussées peut être estimée par le facteur d'Efficacité (E) :

$$E = \frac{\mathrm{Nr}}{Nu}$$

Avec :

Nr = Nombre de répétitions de charge nécessaires pour la rupture de la chaussée renforcée

Nu = Nombre répétitions de charge nécessaires pour la rupture de la chaussée non renforcée

Les données disponibles dans la littérature donnent des valeurs de E pouvant atteindre 16 (Palmeira), ce qui démontre que des augmentations considérables de la durée de vie de la chaussée peuvent être atteintes par l'utilisation des géosynthétique en renforcement ou séparation (Figure II.17). Des observations de terrain et des résultats de recherche confirment les améliorations de la performance des chaussées en lien avec l'utilisation des géosynthétique. [11]

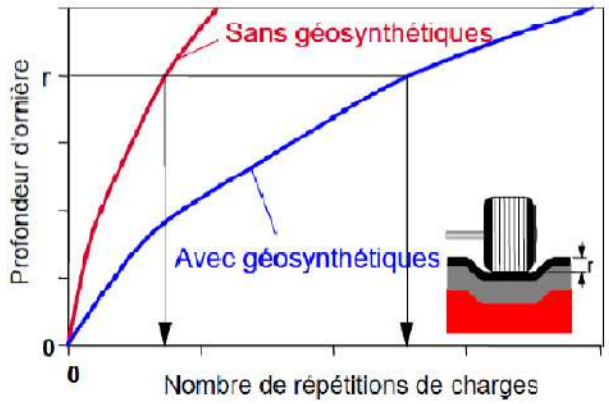



**Figure II.17:** Augmentation de la durée de vie de la chaussée en lien avec l'utilisation d'un renforcement géosynthétiques [37]

## II.8. Conclusion:

Pour conclure ce chapitre, nous pouvons rappeler que les géosynthétiques sont employés en géotechnique routière depuis plus de 30 ans. Les géosynthétiques assurent diverses fonctions, à savoir, filtre, séparation, drainage, barrière, protection, et renforcement.

En ce qui concerne notre présent mémoire nous nous intéressons exclusivement au rôle de renforcement du géosynthétique. Il faut dire qu'en général, le besoin de renforcement augmente quand la résistance de la fondation diminue, le poids des véhicules et le nombre des passages augmente et quand un comportement rigoureux de la chaussée, est souhaité.

Nous avons vu que les géotextiles permettent d'augmenter d'une manière significative le facteur de sécurité. Il s'agit aussi d'une amélioration de la performance et une réduction des coûts en comparaison avec une conception conventionnelle et une construction alternative.

# CHAPITRE III

## PRESENTATION DE L’OUTIL DE SIMULATION ET MODELES DE COMPORTEMENT

## III.1. Introduction:

La modélisation numérique par différentes techniques (éléments finis, différences finies) permet d'analyser la stabilité, la déformation et l'influence de plusieurs paramètres en tout points du modèle dans un temps raisonnable. Dans le présent chapitre, nous donnons une description du code de calcul par élément finis PLAXIS2D, qui sera utilisé dans notre étude et plus particulièrement La description de quelques modèles de comportement disponibles dans ce code.

## III.2. Aperçu de là méthode des éléments finis:

### III.2.1. Historique:

L'histoire de la MEF a commencé en 1819, quand Navier définit une méthode d'étude des systèmes hyperstatiques basés sur l'application des conditions d'équilibre et de compatibilité. Puis Maxwell en 1864 et Castigliano en 1878 établissent d'une façon complète les théorèmes de l'énergie. Au début du 20ème siècle, des résultats fondamentaux dans le domaine des méthodes d'approximation ont été établit les hases en effectuant une discrétisation spatiale du domaine tout en utilisant les méthodes d'approximation variationnelles. En 1955, Argyris présente une approche unifiée des méthodes des déplacements et des forces, l'année suivante Tumer et Clough publient une présentation systématique de la méthode des déplacements. Ces deux publications sont particulièrement importantes et représentent véritablement le début de la MEF comme technique de calcul des structures complexes. [12]

### III.2.2. Concepts de base:

La MEF consiste remplacer la structure physique à étudier par un nombre finis d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante. puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité du déplacement réel de la structure en tant qu'objet continu.

La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures Continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées. Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique. [12]

### III.2.3. Calculs par la MEF:

La méthode des éléments finis est une méthode très générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, Deux ou trois dimensions. De plus elle s'adapte très bien aux milieux hétérogènes souvent rencontrés dans la pratique par l'ingénieur. [12]

Elle nécessite :

- La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières du calcul n'influence pas sur les résultats.
- Le choix d'une loi de comportement du sol, de type Mohr-Coulomb, Cam-Clay, etc.
- Les caractéristiques des ouvrages et des éléments d'interface pour introduire l'interaction sol-structures et les conditions hydrauliques.
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

Elle permet :

- D'effectuer les calculs d'écoulement.
- De simuler toutes les phases de travaux.
- De prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches de terrain.

Les sorties fournissent pour les ouvrages sont :

- Les déplacements des ouvrages.
- Les sollicitations internes des ouvrages.

Et pour le sol :

- Les déplacements du sol.
- Les déformations du sol.
- Les contraintes totales et effectives dans le sol.
- Les pressions interstitielles.

La méthode des éléments finis englobe les étapes suivantes :

**a. La discrétisation:** C'est le processus de modéliser la géométrie du problème sous une étude par un assemblage de petites régions, appelées éléments finis. Ces éléments ont des nœuds définis sur les limites ou dans les éléments mêmes.

**b. L'approximation des variables fondamentales:** Une valeur fondamentale doit être sélectionnée (par exemple : déplacements) et réglée, comme elle doit varier sur un élément fini établi. Cette variation est exprimée par des valeurs nodales.

**c. Équations élémentaires:** L'utilisation du principe variationnel approprié (par exemple : énergie potentielle minimum) pour dériver les équations de l'élément :

$$K^e U^e = P^e$$

**d. Équations globales**: L'assemblage des équations élémentaires sous forme d'équations globales :

$$KU=P$$

**e. Les conditions aux limites:** La formulation des conditions aux limites et la modification des équations globales. L'affectation des charges P, lorsque les déplacements affectent U. Résoudre les équations globales. Les équations globales sont sous forme d'un système à grand nombre d'équations, qui doivent être résolues pour obtenir les déplacements à tous les nœuds. A partir de ces déplacements nodaux, tel que les contraintes et les déplacements sont évalués. [12]

## III.3. Présentation du logiciel:

Le logiciel Plaxis est le logiciel d'éléments finis de référence en géotechnique dont le développement commença en 1987 à l'initiative du ministère des travaux publics et d'hydrologie des Pays-Bas. Son but initial était de créer un code éléments finis facilement utilisable en 2D pour analyser l'effet de l'implantation d'une digue fluviale sur les argiles molles des Pays-Bas. En quelques années, Plaxis a été étendu a plein d'autre domaine de la géotechnique. En 1998 la première version de Plaxis pour Windows est développée Durant la même période une version 3D du logiciel a été développée. Après quelques années de développement le logiciel 3D PLAXIS Tunnel program est sorti en 2001.

PLAXIS 2D est donc un programme en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan (déformation plane) ou axisymétrique. L'algorithme général du code PLAXIS consiste à résoudre un système d'équations algébriques non linéaires selon un processus itératif pour déterminer les valeurs de déplacements aux différents nœuds du maillage, le champ de contraintes et les états de rupture du sol.

Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. [12]

Le manuel d'utilisation du code Plaxis [Brinkgreve et al (2003)] présente une description détaillée du logiciel.

### III.3.1. Les points forts de Plaxis:

- La convivialité de l'interface pour la saisie des données et pour l'interprétation des résultats ;
- Générateur automatique de maillage ;
- Jeu complet de lois de comportement de sol et la possibilité de définir ses propres lois de comportement ;
- Couplage avec les calculs d'écoulement et de consolidation ;
- Prise en compte des éléments de structure et de l'interaction sol-structure ;
- Calculs de coefficient de sécurité.

### III.3.2. Les sous-programmes de Plaxis:

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves) :

### III.3.2.a. Le programme d'entrée de données (Input):

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

Pour générer un modèle d'éléments finis, l'utilisateur doit créer un modèle géométrique à deux dimensions composé de points, de lignes et d'autres composants. La génération d'un maillage approprié, des propriétés et des conditions aux limites élément par élément est réalisée automatiquement par le générateur de maillage de PLAXIS à partir du modèle géométrique précédemment entré. Les utilisateurs peuvent aussi retoucher le maillage d'éléments finis pour améliorer ses performances. La dernière partie de l'entrée des données comprend la génération des pressions interstitielles et des contraintes effectives pour définir l'état initial.

Lorsqu'un modèle géométrique est créé dans le programme Input, il est conseillé de sélectionner les différents éléments selon l'ordre donné dans la seconde barre d'outils (de la gauche vers la droite). En principe, il faut d'abord dessiner les contours géométriques, puis ajouter les couches de sol, les éléments de structure, les couches à construire, définir les conditions aux limites, et enfin les chargements. La barre d'outils suit cette logique. Elle est un véritable guide à travers le programme Input ; elle assure que toutes les données à traiter le seront. [12]

### III.3.2.b. Le programme de calcul (Calculations):

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués. Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type des calculs à réaliser ainsi que les cas de chargement ou les étapes de construction qui seront à appliquer. On opère grâce au programme de calcul (Calculation).

PLAXIS permet d'effectuer différents types de calculs aux éléments finis. Le programme de calcul ne traite que de l'analyse des déformations et permet de réaliser un calcul plastique (Plastic Calculation), une analyse de consolidation (Consolidation Analysis), un calcul de coefficients de sécurité (Phi/C Reduction) ou un calcul dynamique (Dynamic Calculation). [12]

### III.3.2.c. Le programme de résultats (Output):

Les principaux résultats d'un calcul d'éléments finis sont les déplacements aux nœuds et les contraintes aux points de contraintes. De plus, lorsqu'un modèle d'éléments finis inclut des éléments de structure, des efforts sont calculés dans ces éléments. Une vaste gamme d'outils est offerte par PLAXIS pour afficher les résultats d'une analyse aux éléments finis. [12]

### III.3.2.d. Le programme courbes (Curves):

Le programme des courbes (Curves) peut être utilisé pour dessiner des courbes charge- ou temps-déplacements, des courbes contraintes-déformations, des chemins de contrainte ou de déformation pour des points choisis dans la géométrie. Ces courbes représentent les évolutions au cours des différentes phases de calcul, et cela donne un aperçu du comportement global et local du sol.
Les applications géotechniques nécessitent des lois de comportement avancées pour la simulation du comportement des sols et/ou des roches, non linéaire et dépendant du temps et anisotropique.

La réalisation d'une modélisation avec Plaxis se traduit en général, par l'enchainement des étapes suivantes :

- Utilisation du préprocesseur « Plaxis Input », pour la génération des données (maillage, jeu des données et contraintes initiales).
- Lancement du code de calcul éléments finis « Plaxis calculate », pour effectuer la résolution numérique du problème étudié.
- Utilisation de post-processeur « Plaxis Output », pour l'interprétation des résultats sur écran graphique.
- Utilisation de post-processeur « Plaxis curve », pour l'interprétation des courbes (courbe de consolidation, chemin des contraintes,… etc.). [12]

## III.3.3. La démarche de modélisation avec Plaxis:

Nous présenterons ici le cheminement et principales étapes d'un calcul sous Plaxis :

### III.3.3.1. Géométrie:

La première étape sous Plaxis est la définition de la géométrie. Un certain nombre de propriétés sont disponibles :
- Les lignes géométriques qui sont la pour dessiner l'organisation du sol.
- L'outil (plates) permet de dessiner et de définir des structures élancées qui possèdent une résistance en traction, compression et une résistance en flexion, Cet outil est principalement utilisé pour modéliser des murs, des poutres des coquilles, des plaques pour modéliser les murs et les zones rigides. (Principalement les éléments ayant une forte extension selon l'axe perpendiculaire au plan de modélisation (ici z)**.**
- (Anchor) qui sert à modéliser les liaisons entre les éléments. Ce sont des ressorts, qu'on utilise pour modéliser les batardeaux ou plus exactement la liaison entre les différents éléments d'un batardeau.

- L'outil (geogrid), sert à dessiner des structures élancées avec une résistance en compression ou traction mais qui ne possèdent aucune résistance de flexion. Cet outil est généralement utilisé pour modéliser les géogrilles et ancrages.

Sur Plaxis, il y a également un outil tunnel qui permet de modéliser un tunnel prenant en compte les facteurs qui concernent ce type d'ouvrage. [12]

### III.3.3.2. Conditions aux limites:

Une fois la géométrie définie, il faut entrer les conditions limites, c'est-a-dire les déplacements et les contraintes imposées aux limites extérieures de la géométrie.
Si aucune condition limite n'est fixée sur un tronçon, par défaut le logiciel considère que l'élément n'est soumis a aucune force extérieure et est libre de se déplacer dans toutes les directions.
Les conditions limites pouvant être imposées sont celles qui imposent un déplacement dans une direction donnée ou celle qui impose une force dans une direction donnée. Plusieurs outils permettent de créer une large gamme de conditions limites (force repartie, force ponctuelle, encastrement, glissement, etc.....). [12]

### III.3.3.3. Définition des paramètres des matériaux:

Ensuite, il convient de définir les différentes propriétés des différents matériaux selon son type (sol et interface, plaque, ancrage, géogrille, etc…), le modèle de comportement et les différents paramètres permettant de le définir. Pour les sols, en plus de la définition des caractéristiques mécaniques, leurs interfaces avec les autres types d'éléments peuvent être paramètres, il faut également définir le comportement hydraulique du sol (drainer, non-drainer ou non-poreux). [12]

### III.3.3.4. Maillage:

Le maillage est génère automatiquement, ce qui est un point fort de Plaxis. L'operateur peut paramétrer la finesse du maillage entre différentes options (très grossier, grossier, moyen, fin, très fin), l'opérateur peut également décider de mailler plus finement une certaine région du sol ou/et le voisinage d'un élément grâce aux options *refine* dans le *mesh* menu.
Une fois le maillage effectue, il convient de paramétrer les conditions initiales du sol, cette procédure passe généralement par la définition d'un coefficient des terres au repos. [12]

### III.3.3.5. Les conditions initiales:

La définition des conditions initiales se fait en deux étapes distinctes :
Tout d'abord, lorsque la fenêtre des conditions initiales s'ouvre, seul le sol est activé. L'opérateur active les éléments constructifs (déplacements et/ou contraintes impose(e)s, ancrage, plaque) qui correspondent à l'instant initial. Il désactive les éléments de sol qui ne correspondent pas à cet instant initial.

Un «Switch bouton» permet d'accéder a deux fenêtres différentes chacune représentant la géométrie de la modélisation :
La première qui s'appelle *"initiale pore pressure"* permet de définir un niveau de nappe phréatique initial (si besoin), et de générer les pressions interstitielles correspondantes ;
La deuxième fenêtre permet de générer les contraintes initiales a l'intérieur du massif (poids propre et sous pression). [12]

### III.3.3.6. Phase de calcul:

Après avoir effectué 1'ensemble de ces paramétrages on peut accéder aux calculs par le bouton poussoir *'calculation'*. L' interface *'input'* de (plaxis) se ferme et laisse la place à une nouvelle interface : 'calculation'. Une phase 0 est déjà calculée. Cette phase correspond à 1'état initial de la structure. Cette interface permet de définir le phasage de la modélisation de la construction.
De nouvelles phases de calcul peuvent être créées basées sur une phase existante. Pour chaque phase on peut modifier la géométrie par l'intermédiaire de la même interface qui a servi à définir les conditions initiales. On peut donc effectuer des changements uniquement en activant ou désactivant des éléments. Le niveau de la nappe phréatique peut être modifié, ainsi que certaines propriétés des matériaux, des éléments autres que le sol (modification des paramètres entrés en input, imperméabilité et/ou la non-consolidation de certaines parois). Le niveau d'intensité et la position des conditions limites des chargements en déplacement et en contrainte peuvent également être modifiés.
Cependant, aucun nouvel élément ne peut être créé à ce niveau que ce soit une charge un déplacement, une condition aux limites ou une plaque un ancrage etc....
D'autre types de phases peuvent être créés autre que la simple activation ou désactivation d'élément (phase de consolidation par exemple). Un certain nombre de types de calcul peut être simulé (consolidation, détermination du facteur de sécurité, déformation plastic, étude dynamique)
Une fois le phasage de l'étude terminé, des points caractéristiques peuvent être placés. Les courbes de résultats de Plaxis seront calculées en ces points. Après avoir appuyé sur 'calculate' les calculs se lancent. Une fois terminée, les résultats sont visionnables grâce à la touche 'output'. [12]

### III.3.3.7. Visualisation des résultats:

Le code plaxis contient plusieurs outils pour visualiser et analyser les résultats concernant le sol soit en déformations (maillage déformé, déplacements et déformations totaux) soit en contraintes (contraintes effectives, totales, les points plastiques, les pressions interstitielles). [12]

## III.3.4. Les modèles de comportements intégrés dans PLAXIS:

Plusieurs lois de comportement ont été utilisées dans les logiciels de calcul en géotechnique en se basant sur les méthodes des éléments finis. Les lois de comportement expriment une relation entre le tenseur de contraintes, le tenseur de déformations et leurs accroissements respectifs pouvant impliquer un critère de rupture ou de limite d'élasticité. Le choix d'un modèle dépend du comportement du matériau à étudier et du type d'analyse que l'ingénieur géotechnicien souhaite effectuer.

L'utilisation de lois de comportement complexes dans des modèles éléments finis pour l'ingénierie est délicate. Elle demande pour la détermination des paramètres des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie. L'intégration de telles lois dans des codes éléments finis est difficile. Le coût de ces calculs est généralement important et peu de codes sont actuellement opérationnels. La démarche suivie dans le développement de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant un modèle de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d 'une étude géotechnique normale.
Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implémentés dans Plaxis : élastique linéaire, Mohr-Coulomb, modèles de sol avec écrouissage ou spécifiques aux sols mous, etc. Il reste toutefois à l'ingénieur de choisir le modèle le mieux adapté au problème qu'il désire traiter en fonction des conditions rencontrées in situ. [12]

## III.3.4.1. comportement élastoplastique:

Le comportement élastoplastique (cas élastique parfaitement plastique) peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur K. pour symboliser l'élasticité du matériau, à un patin de seuil S0 (figure III.1).

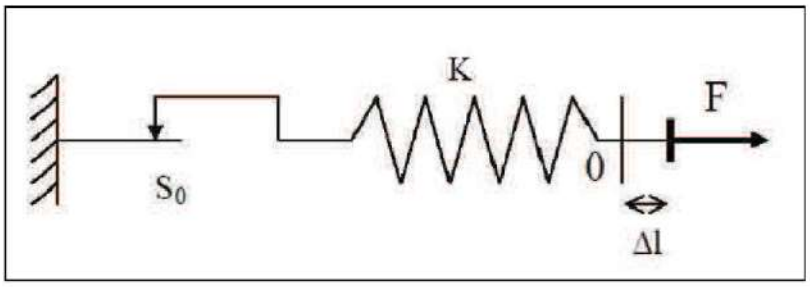



**Figure III.1:** Modèle monodimensionnel du comportement élastique parfaitement plastique [12]

Le courbe effort déplacement ou contrainte déformation que l'on trouve est présentée sur la (figure III.2)

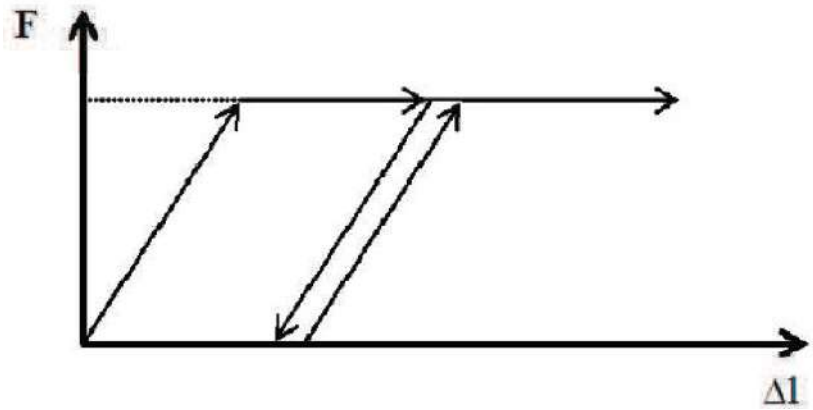



**Figure III.2:** Représentation du comportement élastique parfaitement plastique [12]

Lors d'une décharge, le comportement est élastique et réversible. La longueur de la déformation plastique est à priori indéterminée.
Le type de comportement représenté par les figures (III.1) et (III.2) est un comportement élastique-plastique sans écrouissage. La figure (III.3) représente un comportement élastique-plastique avec écrouissage. [12]

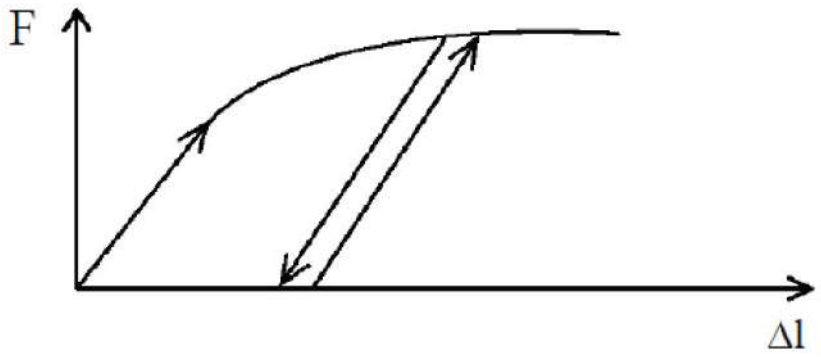



**Figure III.3:** Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage [12]

## III.3.4.2. Modèle élastique linéaire:

Le modèle élastique utilisé dans Plaxis est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement G et le coefficient de poisson ν. L'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau (Gu = G'). ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module de Young non drainé est supérieur au module de Young drainé. Il aurait pu sembler logique, si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. D'une part Ku est défini (correspondant à $\nu_u = 0.5$) et il est moins courant d'emploi, G est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques. On passe de G à E par la relation:

$$E = 2\,G\,(1+\nu)$$

Le modèle élastique linéaire de PLAXIS peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structures béton ou métal en interaction avec le sol. Il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches. [12]

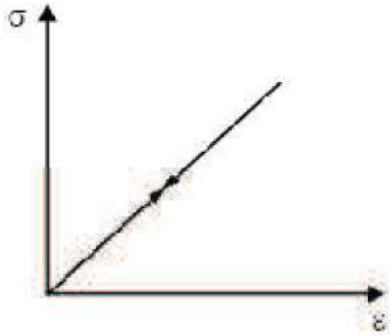



**Figure III.4:** courbe contrainte-déformation pour le modèle élastique linéaire [12]

### III.3.4.3. Modèle de Mohr-Coulomb:

Le modèle Mohr-Coulomb est un modèle souvent utilisé pour représenter la rupture par cisaillement dans les sols et les roches tendres. Cette loi se caractérise par une élasticité linéaire isotrope de Hooke, une surface de charge et un potentiel plastique. Les règles d'écoulement sont non associées. La fonction de charge est confondue avec le critère de rupture. À l'intérieure de la surface de rupture, le comportement du matériau est supposé élastique linéaire isotrope ou anisotrope. Sur la surface de rupture, le comportement est considéré comme parfaitement plastique.

Dans l'espace de contraintes principales (σ1, σ2, σ3), la surface de rupture est une pyramide de section hexagonale d'équation :

$$F(\sigma_{ij}) = |\sigma_1 - \sigma_3| - (\sigma_1 - \sigma_3)\sin\varphi - 2c\cos\varphi = 0$$

Où $\sigma_1$ et $\sigma_3$ représentent les contraintes extrêmes ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$). Cette pyramide est centrée autour de la trisectrice de l'espace des contraintes principales (1er invariant des contraintes) comme illustré figure (III.5).

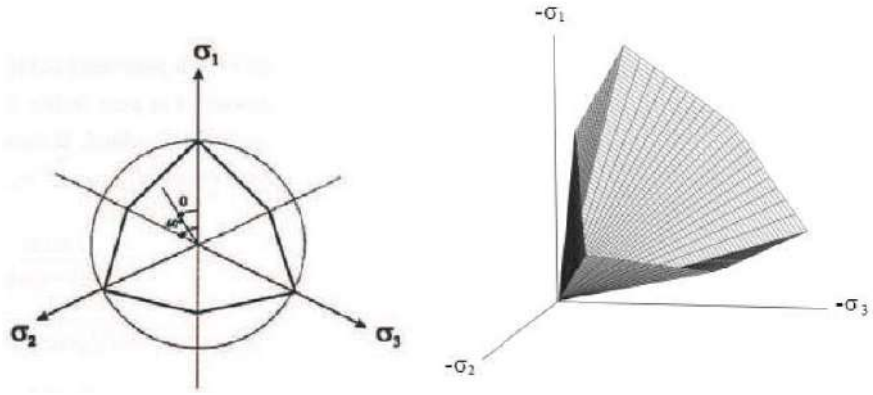



**Figure III.5:** surface de charge adoptée par le modèle MC pour un sol sans cohésion [12]

Le modèle de Mohr-Coulomb utilisé dans Plaxis est un modèle de comportement simple et robuste. Il peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel d'un sol.

Le modèle de Mohr-Coulomb constitue une approche acceptable pour analyser la rupture des sols dans les problèmes de fondation, stabilité de pentes, de tunnel et de soutènement. Cependant, ce modèle suppose une rigidité constante pendant la phase de chargement alors qu'en réalité elle dépend à la fois du niveau de contrainte et du niveau de déformation du sol. De plus, expérimentalement il est possible d'observer des déformations irréversibles même pour des chemins de contraintes qui n'atteignent jamais la rupture. Or, un tel modèle n'est pas capable de reproduire ce phénomène. [12]

Le modèle de Mohr-Coulomb nécessite cinq paramètres fondamentaux :

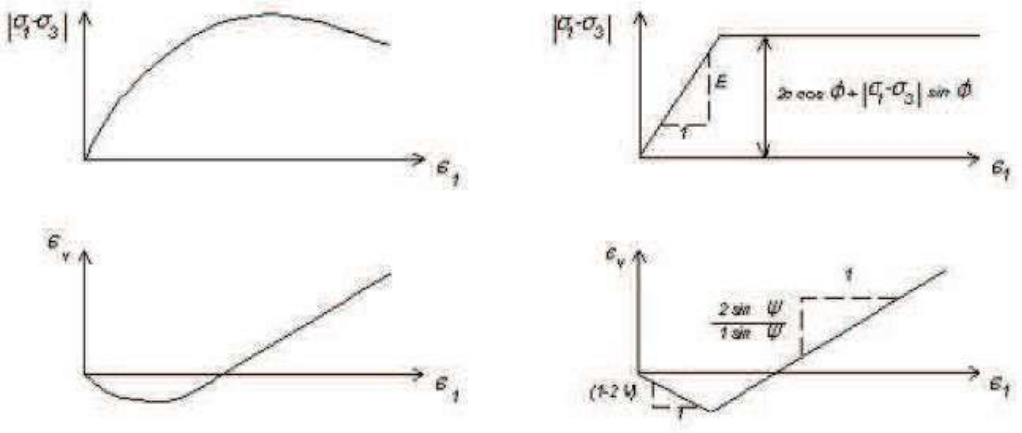
- deux paramètres élastiques : le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν ;

- deux paramètres relatifs aux conditions à la rupture : la cohésion *C* et l'angle de frottement φ ;

- un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique, l'an1e de dilatance ψ.

Ces paramètres sont facilement identifiables à partir d'essais de laboratoire, essais œdométriques ou triaxiaux figure (III.6).

a)




b)

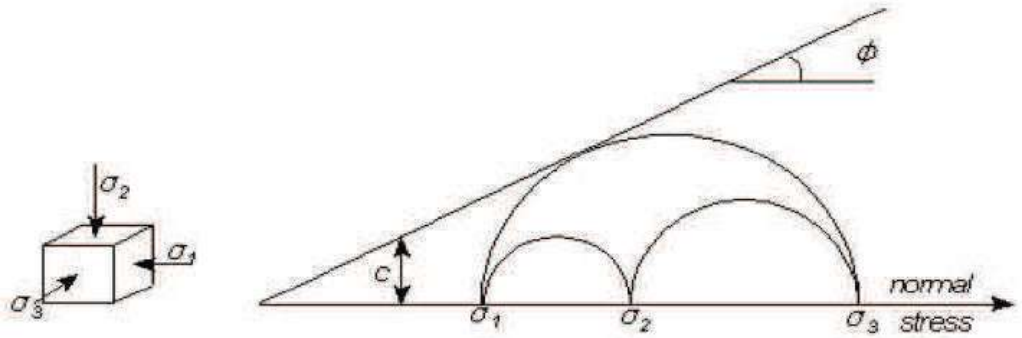



**Figure III.6:** modélisation d'un essai de compression triaxial avec le modèle de Mohr-Coulomb (a) et représentation des contraint dans le plan de Mohr (b) [12]

- **Le module de Young E:**

Le choix d'un module de déformation est l'un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il parait peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au Gmax mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module «moyen», par exemple celui correspondant à un niveau de 50% du déviateur de rupture (figure III.7).
L'utilisation doit rester consciente de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. [12]

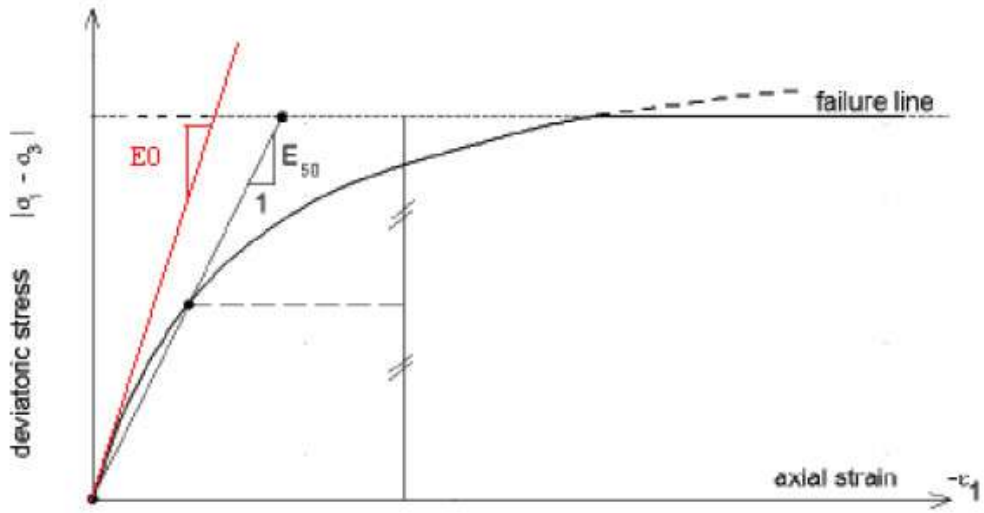



**Figure III.7:** définition du module à 50% de la rupture [12]

- **Le coefficient de poisson:**

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure de $K_0$ Ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de poisson s'approche de 0.5 sans cette valeur soit utilisable. [12]

- **La cohésion:**

Les sols pulvérulents n'ont pratiquement pas de cohésion, 0 < c < quelques kiloPascals. On parle de cohésion capillaire ou de cimentation en place. Les sols cohérents ont une cohésion comprise entre quelques kiloPascals et plusieurs centaines de kiloPascals.
Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottants, une très faible cohésion (0.2 à 1KPa) pour des questions numériques. [12]

- **L'angle de frottement:**

Plaxis ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier. On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs 45° peuvent considérablement allonger les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angles de frottement (à volume constant. au palier).
La valeur de l'angle de frottement φ est couramment comprise entre 15 et 45°. Les valeurs inférieures ou autour de 30° sont typiques des argiles, tandis que des valeurs supérieures, entre 25 et 45°, caractérisent les sables. [12]

- **L'angle de dilatance:**

L'angle de dilatance ψ est quant à lui généralement compris entre 0 et 15°. Les sables lâches et les argiles ont des valeurs de dilatance très faibles, quelques degrés à peine voire zéro. D'une manière générale, l'angle de frottement est pratiquement toujours supérieur à l'angle de dilatance. La valeur de ψ peut être simplement déterminée à partir de la pente de dilatance observée dans les essais triaxiaux (figure III.8). Il existe également une relation empirique simple, généralement bien vérifiée pour les sables denses, reliant l'angle de dilatance et 1'angle de frottement interne :

$$\psi = \varphi - 30° \quad \text{pour} \quad \varphi > 30°$$

$$\psi = 0^{o} \quad \text{pour} \quad \varphi < 30°$$

Le cas où $\psi < 0°$ correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur $\psi = 0^{o}$ 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 faible ou moyenne sous contraintes assez fortes. [12]

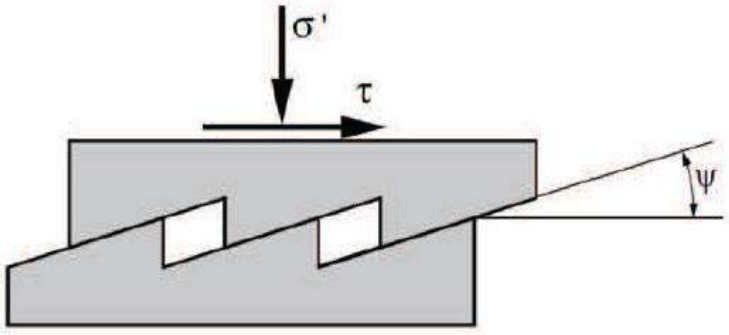



**Figure III.8:** Angle de dilatance [12]

### II.3.4.4. Modèle de sol avec écrouissage (Hardening soil model):

C’est un modèle hyperbolique de type élastoplastique formulé dans le cadre de la plasticité avec écrouissage en cisaillement. De plus, ce modèle prend en compte l’écrouissage en compression pour simuler le compactage irréversible d’un sol sous son premier chargement en compression. Ce modèle du deuxième ordre permet de simuler le comportement des sables, des graves, mais aussi de sols plus mous comme les argiles et les limons. [12]

### II.3.4.5. Modèle pour les sols mous (soft soil model):

C’est un modèle de type Cam-Clay qui permet de simuler le comportement de sols mous comme des argiles normalement consolidées ou de la tourbe. Ce modèle s'applique très bien aux situations où la consolidation primaire est prépondérante. [12]

### III.3.4.6. Modèle pour les sols mous avec fluage (soft soil creep model):

C’est un modèle du deuxième ordre formulé dans le cadre de la viscoplasticité. Ce modèle permet de simuler le comportement des sols mous, comme les argiles ou les courbes normalement consolidées, en fonction du temps. Ce modèle prend en compte la compression logarithmique. [12]

### III.3.4.7. Modèle pour les roches fracturées (jointed rock model):

C’est un modèle élastoplastique anisotrope, pour lequel le cisaillement plastique peut se produire seulement dans un nombre limité de directions de cisaillement. Ce modèle peut être utilisé pour simuler le comportement des roches stratifiées ou fracturées. [12]

### III.3.4.8. Modèle défini par l’utilisateur:

Cette option permet de définir et d'utiliser des lois de comportement autres que les modèles standard de PLAXIS. Pour une description plus détaillée de cette option, veuillez vous reporter au manuel des modèles de matériaux (Material Models Manual). [12]

## III.4. Conclusion:

La modélisation numérique d’un ouvrage géotechnique, réalisée à l’aide d’un code de calcul aux éléments finis, est une approche simplifiée de la réalité géométrique et géomécanique de 1‘ouvrage.

Les modèles disponibles dans le code Plaxis2D ont été brièvement décrits en distinguant parmi eux ceux adaptés à la simulation du comportement des sols granulaires et ceux plus adaptés pour la simulation du comportement des argiles.

Le choix du modèle de comportement dépend du nombreux facteur et notamment le type d’ouvrage étudié : soutènement, tassement de remblai, fondation sur sol en pente, tunnel, route …

# CHAPITRE IV

## PRESENTATION DE PROJET

# IV.1. Introduction:

Ce chapitre présent l'étude géotechnique et le dimensionnement de corps de chaussée correspondant à la section 1 de l'étude d'exécution du dédoublement de la RN01 entre Berrouaghia et Boughzoul (PK 109+000 - PK 177+500) entre Seghouane – Moudjebeur.

# IV.2. Situation géographique:

## IV.2.1. Situation géographique de wilaya:

La wilaya de Médéa est située au Nord de l'Algérie, Le Chef-lieu de la wilaya est à 88 km à l'Ouest de la capitale, Alger. Elle s'étend sur une superficie de 8.775,65 Km². La wilaya est une zone de transit principale et un trait d'union entre le Tel et le Sahara, d'une part, et entre les Hauts Plateaux de I 'Est et ceux de I 'Ouest, d'autre part.




**Figure IV.1:** Situation géographique de la wilaya de Médéa (Référence: GOOGLE EARTH)

## IV.2.2. Situation géographique de site:

Notre site est situé entre Seghouane et Moudjebeur sur 16,2 km, soit du PK 0+000 au PK 5+900.

Le tableau (IV.1) résume les cordonnées de notre projet et la figure au dessous présente la situation géographique de site de projet.

| | X | Y | Elevation (m) |
|---|---|---|---|
| A | 36°00'00.50'' N | 2°53'59.06'' E | 662 |
| B | 35°57'03.20'' N | 2°49'21.37'' E | 617 |

**Tableau IV.1:** Cordonnées de la section (Référence: GOOGLE EARTH)




**Figure IV.2:** Situation géographique de site (Référence: GOOGLE EARTH)

## IV.3. La géologie de la région:

Sur le plan géologique, la région de Médéa appartient à la chaîne montagneuse de l'Atlas tellien et à l'extrémité nord des hauts plateaux. Les formations du crétacé sont généralement développées dans la partie nord de la wilaya et les dépôts du cénozoïque dans sa partie sud (figure IV.3), les grands ensembles géologiques de la région sont de haut en base.

### IV.3.1. Hydrologie de la région:

La wilaya de Médéa est subdivisée en 3 bassins versants principaux :

- Le bassin du Chlef, avec l'oued le plus important d'Algérie qui occupe la partie Sud Ouest de la wilaya (en partie) ; Ksar El Boughari.
- Le bassin de l'Oued Isser, est situé à l'Est de l'oued Chlef ; ces deux oueds ont une limite commune de bassin versant.
- Le bassin de la Mitidja, est représenté au niveau de la wilaya par l'oued Chiffa qui prend naissance au niveau de la région d'Ouzera, c'est l'oued le plus important de la Mitidja. IL se déverse dans l'oued Mazafran (Zeralda. W. d'Alger).

Tous ces oueds sont alimentés principalement à la faveur des précipitations atmosphériques et de sources surplombant ces oueds.

Les nappes d'eau souterraines peuvent alimenter les oueds suivant les saisons puisque les relations oueds nappes existent.
Les oueds chlef, Isser et Chiffa peuvent être considérés comme les principaux collecteurs des eaux des bassins versants correspondants.

## IV.3.2. La morphologie de la région:

Le relief de la wilaya de Médéa se compose de quatre principales zones qui sont:

**1. La zone montagneuse**

Elle se compose d'une chaine de montagnes continue qui limite la partie ouest et nord de la wilaya, cette zone s'étend des monts de l'Ouarsenis jusqu'à Tablat (limites de la wilaya de Médéa avec les wilayas d'Alger et Bouira).

**2. La zone tellienne**

Se situant au milieu de la wilaya, elle se distingue par son caractère agricole notamment la culture de la vigne qui produit différentes variétés de raisin, en plus des agrumes de toutes sortes dont principalement les pommes.

**3. La zone des plaines**

Elle comprend les plaines de Beni Slimane et de M'Rachda qui se situent au milieu de la zone tellienne. Ces plaines se singularisent par la culture des arbres fruitiers.

**4. La zone du sud**

Cette zone se caractérise par l'irrégularité de la pluviométrie.

## IV.4. Reconnaissance géotechnique:

L'objectif attendu par le programme de reconnaissance géotechnique est de permettre la reconnaissance des sols en place et de déterminer leurs caractéristiques géotechniques, en vue du dimensionnement du corps de chaussée. La reconnaissance géotechnique du site étudiée a été effectuée par (Laboratoire Des Travaux Public De L'Est).

- **Programme sure site:**

Dans notre cas le tracé de la route passe, dans sa plus grande parte en remblais. Les zones où les déblais sont les plus importants sont sur la section de l'évitement de Seghouane. Pour le reste du tracé les déblais sont faibles. A cet effet, le programme de l'investigation géotechnique arrêté pour la section Seghouane Boughezoul est comme suit :
- Soixante douze (72) puits de reconnaissance d'une profondeur allant de 2 à 3.00 m, réalisés le longs de l'axe du tracé.
- Un sondage carotté de 30 ml de profondeur, réalisé au niveau de la zone de déblais au PK 2+800 sur la section de l'évitement de Seghouane.

- **Essais de laboratoire:**

Une série des essais mécanique, physique et chimique a été effectué a partir des échantillons de terrain prélevés des puits et des sondages carottés, les essais de laboratoire suivants ont été réalisés:

## IV.4.1. Les essais physiques:

**- Analyse grano-sédimentométrique:**

L'analyse granulométrique d'un sol a pour but de déterminer, en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions. De cette distribution résulte la classification du matériau. L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives:

- Le tamisage pour les particules de dimensions supérieures à 80 µm.
- Lorsque le sol étudié comporte une quantité importante de particules inférieures à cette taille, on procède à analyse en sédimentométrie.

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 0.100 mm.

L'ensemble des résultats sont résumé dans le tableau **(**IV.2), (C2 teneur en particules de diamètres inférieurs à 2 µm ; C80 teneur en particules de diamètres inférieurs à 80 µm) selon les résultats obtenu on constate que 99% des éléments sont inferieurs de 0,08 mm et d'après la classification de USCS-LCPC le sol est classé comme un sol fin.

**- Limites d'Atterberg:**

La détermination des limites d'Atterberg est fondamentale dans le cas des argiles car elles permettent d'évaluer la plasticité.

- **Limite de liquidité (WL)**: correspond à la teneur en eau permettant un éloignement des particules suffisant pour annuler pratiquement les forces inter particulaires ce qui leur permet un libre déplacement relative
- **Limite de plasticité (WP)**: correspond à la teneur en eau suffisante pour permettre une certaine liberté de déplacement relatif des particules mais trop faible pour les 1oigner au point de réduire fortement les forces de liaisons entre elles.
- **Indice de plasticité (IP)**: $IP = W_L - W_P$ : celui-ci correspond à l'amplitude du domaine plastique dans lequel le matériau peut subir des déformations irréversibles à volume constant sous contraintes.

D'après l'abaque de Casagrande (figure IV.4) la nature de sol est un sol très plastique. Selon la classification GTR (Guides pour les Terrassements Routiers) des matériaux pour remblais et couche de form, les sols rencontrés sur la section entre Seghouane et Moudjebeur sont en générale des sols très plastique de classe A et sous classes A3 (25 < IP < 40). Le tableau (IV.2) résume les résultats obtenu.

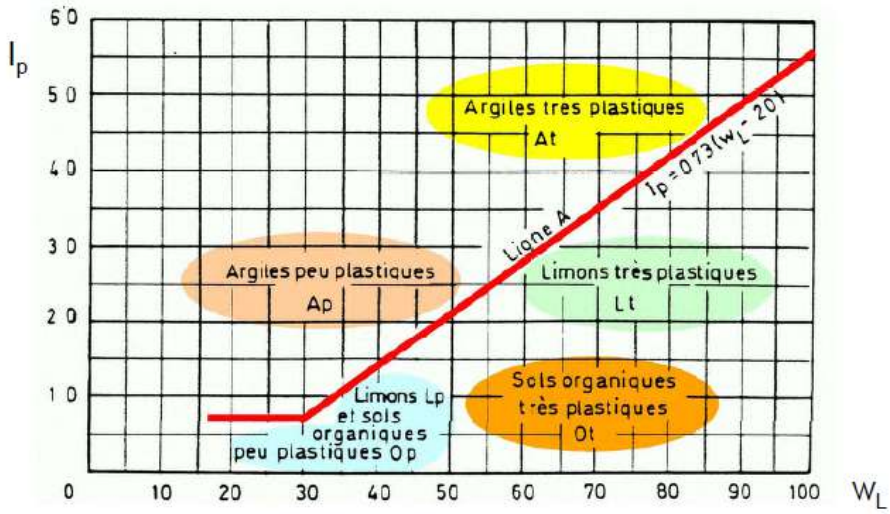



**Figure IV.3**: Abaque de Casagrande pour le classement des sols

L'ensemble des résultats des essais physiques sont présenté dans le tableau suivant :

| ESSAIS PHYSIQUES | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DENSITÉ | | TENEUR D'EAU | | GRANULOMETRIE | | | | | | | LIMITES D'ATTERBERG | | | | |
| γd (t/m3) | γh (t/m3) | W (%) | Sr (%) | <20 mm (%) | <10 mm (%) | <5 mm (%) | <0,4 mm (%) | <0,2 mm (%) | <0,08 mm (%) | < 0,002 mm (%) | WL (%) | WP (%) | IP (%) | IC | AC |
| 1,64 | 1,98 | 20,20 | 87,44 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 99 | 59 | 61.75 | 30.64 | 31.11 | 1.33 | 0.31 |

**Tableau IV.2:** Résultats des essais physiques

## IV.4.2. Les essais mécaniques:

**- Essai Proctor modifie**

Il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale conduisant à une force portante maximale pour un sol donné, selon des conditions de compactage précises.

Donc on détermine la teneur en eau optimum Proctor modifié ($W_{OPM}$ en %) et masse volumique sèche maximale Proctor modifié ($\rho d_{OPM}$) elle s'applique aux matériaux suivants (non traités ou traités à la chaux ou aux liants hydrauliques).

Les caractéristiques de compactage Proctor de notre matériau sont dans le tableau (IV.3). le matériau argileux pèsent une densité sèche maximale de (1.73t/m³) avec un teneur en eau optimale (16,30%).

Les sols de classe A3 sont très cohérents à teneur en eau moyenne (0,9.WOPN < Wn < 1,2.WOPN) et faible, et collent ou glissent à leur état humide, d'où la difficulté de leur mise en œuvre. Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes en place.

**- Essai CBR**

La portance d'un sol est la caractéristique qui définit sa capacité à supporter les charges qui lui sont appliquées. La portance dépend de la nature du sol, du pourcentage d'eau et du degré de compactage. Quel que soit le sol, sa résistance mécanique augmente avec sa densité en faisant passer plusieurs fois des engins lourds qui assurent le compactage.

La portance du sol et sa teneur en eau optimum sont déterminés par l'essai Proctor.

L 'indice C.B.R peut être:

- Immédiat ou après immersion (généralement pendant 4 jours, cet essai est indispensable pour un dimensionnement du corps de chaussée).
- L'indice portant immédiat (IPI) permet d'évaluer 1'aptitude d'un sol à supporter la circulation des engins de chantier.

L'essai consiste essentiellement à placer le sol à étudier dans un moule normalisé, à le compacter jusqu'à lui donner la densité sèche Proctor modifié, puis à placer dans 1'eau pendant un temps déterminé (4 jours), de manière qu'il s'imbibe aussi profondément que possible. Une fois 1'imbibition supposée terminée, on effectue sur le matériau un poinçonnement à l'aide d'un piston cylindrique de 19,3cm$^2$ de section, enfoncé à une vitesse constante de 1,27mm/min.

Les valeurs particulières des deux forces ayant provoquées des enfoncements de 2,5 et 5 mm sont rapportés aux valeurs 13,35 et 19.93 KN qui sont des forces observées dans les mêmes conditions sur un matériau de référence.

La valeur de 1 **'ICBR** est telle que: $$ICBR = \max\left(\frac{P(2{,}5)}{0{,}5}; \frac{P(5)}{1{,}05}\right)$$

Les paramètres des portances obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

| ESSAIS MÉCANIQUES | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Proctor modifié | | C.B.R imbibé à 4 jours | | | | | | | | | ICBR | |
| γdopm (t/m3) | ωopm (%) | 55 coups | | | 25 coups | | | 10 coups | | | A 100 % de l'Opm | Classes de portance (Sol support) |
| | | γd (t/m3) | ICBR | Gonflement (%) | γd (t/m3) | ICBR | Gonflemt (%) | γd (t/m3) | ICBR | Gonflement (%) | | |
| 1.73 | 16.30 | 1.72 | 3.38 | 1.37 | 1.67 | 3.30 | 1.57 | 1.56 | 2.63 | 2.16 | 3.38 | S4 |

Les paramètres de cisaillement et l'essai de gonflement sont présentés dans le tableau suivant :

| ESSAIS MÉCANIQUES | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| CISAILLEMENT | | | OEDOMETRE | | |
| c' (bar) | φ (°) | Type | Pc (bar) | Cc | Cg |
| 0,340 | 20 | CD | 1,43 | 0,255 | 0,038 |

**Tableau IV.3:** Résultats des essais mécanique

L'indice CBR à 100 % de l'OPM (55 coups/couches), obtenue après 4 jours d'imbibition, montrent de sol de faible portance. D'après le Fascicule 1 du Guide de Dimensionnement des Chaussées Neuves, la classe de portance des sols support serait la classe S4. C'est la classe la plus faible.
Les résultats obtenus montre aussi que le matériau étudie présente une forte cohésion de 0.345 bar avec un indice de gonflement important.

## IV.4.3. Les essais chimique:

Cette analyse à porte sur la détermination de la nature chimique des matériaux a étudié. Dans ce cadre une analyse chimique a été effectuée dans laboratoire EPE pour déterminer les différents éléments qui influent sur notre matériau, les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

| ESSAIS CHIMIQUES | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Insolubles (%) | CaCO3 (%) | Gypses (%) | SO4 (%) | Cl (%) | MO (%) |
| 45.9 | 26.61 | 13.07 | 2.43 | 0.12 | 5 |

**Tableau IV.4:** Résultats des essais chimique

Les résultats des analyses chimiques obtenus, montrent la présence des gypses marquée par les sulfates. La présence de ces gypses peut être à l'origine des valeurs de gonflements élevées obtenues. Il est nécessaire de prévoir la protection de l'assise avec une couche de matériaux insensibles à l'eau, notamment sur les sections qui présentent des tendances au gonflement élevées.
Le résultat obtenu montre aussi que le matériau étudié contient un pourcentage important de carbonate. Selon la norme NFP 094-48 qui est basé sur la classification des sols selon le pourcentage de carbonate, notre matériau a été classé comme un matériau peu calcaire.

## IV.4.4. Essai pressiométrique:

L'ensemble des résultats d'essais pressiométrique sont présenté dans le tableau suivant :

| Profondeur (m) | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E (bar) | 73,2 | 71,0 | 109,2 | 59,4 | 83,3 | 37,0 | 58,1 | 43,5 | 29,9 | 69,4 |
| Pl (bar) | 12,5 | 7,2 | 10,2 | 5,9 | 6,5 | 5,9 | 6,3 | 5,9 | 6,7 | 8,2 |
| Pf (bar) | 5,6 | 3,4 | 4,5 | 3,1 | 3,5 | 3,3 | 3,7 | 3,0 | 3,9 | 4,7 |
| E/Pl | 5,85 | 9,86 | 10,70 | 10,06 | 12,81 | 6,27 | 9,22 | 7,37 | 4,46 | 8,46 |

**Tableau IV.5:** Sondage pressiométrique SP-002-1.7-S1, section 1

# IV.5. Dimensionnement du corps de chaussée:

## IV.5.1. Caractéristiques des sol-supports:

### IV.5.1.1. Classes de portance:

Les sols-supports des chaussées à l'étude sont classés selon la portance à long terme basée sur la valeur CBR :

S4: CBR < 5
S3: 5 ≤ CBR <10
S2: 10 ≤ CBR <25
S1: 25 ≤ CBR <40
S0: 40 ≤ CBR

### IV.5.1.2. Valeurs caractéristiques le dimensionnement et sur classements requis:

Les valeurs CBR utilisées pour la classification des sols-supports sont basées sur les résultats des sondages, essais et analyses effectués dans la zone.

L'analyse de ces données indique que les sols-supports sur lesquels seront construits les divers types de chaussées sont principalement de types S4 (CBR=3).

La construction des chaussées du réseau principal de niveau 1 nécessite un sol support de classe minimale S2. Un sur classement des sols-supports S4 vers une classe S2 à l'aide d'une couche de forme est donc requis. Les couches de forme requises sont les suivantes:

- Sur classement S4>>S2 : couche de forme d'une épaisseur de 600 mm en 2 couches.

La mise en place des couches de forme plus épaisse, telles que celles requises pour le surclassement des sols-supports des chaussées du réseau principal de niveau 1 vers la classe S2, permet de réduire de façon significative l'épaisseur requise des matériaux liés (BB ou GB) ainsi que les coûts associés.

## IV.5.2. Sollicitation par le trafic lourd:

### IV.5.2.1. Classes de trafic lourd:

Les chaussées à l'étude sont classées selon le volume de poids lourds par jour et par direction, pour l'année horizon 2025, selon les classes suivantes :

TPL 0 : 0-50 PL/j/sens
TPL 2 : 100-150 PL/j/sens
TPL 5 : 600-1500 PL/j/sens
TPL 6 : 1500-3000 PL/j/sens
TPL 7 : >3000 PL/j/sens

La classe de trafic lourd des chaussées à l'étude est définie par le calcul suivant :
Trafic PL = trafic total (TJMA) de la direction la plus sollicitée X 30 % (pourcentage total de poids lourds) X 90 % (pourcentage de poids lourds sur la voie de droite).

**IV.5.2.2. Valeurs caractéristiques de dimensionnement:**
Les valeurs TPL utilisées pour le dimensionnement sont pour l'année horizon 2025.
L'analyse des données de l'étude de trafic permet d'identifier les volumes de trafic présentés au tableau (IV.6).

| **Section Seghouane - Moudjebeur** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Année** | TJMA/Sens | Volume PL (30% DJMA) | Volume PL sur voie de design (90%PL) | TPL |
| **2007** | 4.160 | 1.248 | 1.123 | 6 |
| **2025** | 23.989 | 7.197 | 6.477 | 7 |

**Tableau IV.6:** Volumes de trafic lourd de Section Seghouane – Moudjebeur

Le volume de poids lourds retenu pour le dimensionnement structural des chaussées de la RN-01 dans le tronçon Seghouane - Moudjebeur est de classe TPL 7.

## IV.5.3. Structures de chaussée étudiée :

Selon l'analyse géotechnique et le volume de trafic, la structure de chaussée recommandée a été présentée sur la figure (IV.5).

La structure recommandée est :
Sur sol-support **S4 : 8BB + 14GB + 15GB + 60 MNT couche de forme (2)**

| Revêtement | Base | Fondation | Couche de forme | Sol support |
|---|---|---|---|---|
| 8 BB | 14GB | 15GB | 60 | S4 |

**Tableau IV.7:** Validation de structure de chaussée

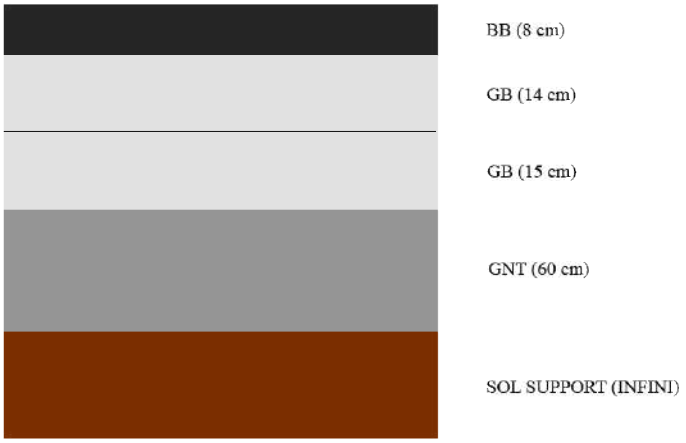



**Figure IV.4:** Présentation de la structure de chaussée

## Conclusion :

L'observation du déroulement des travaux et l'analyse des résultats de reconnaissance géotechnique permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats des essais d'identification (granulométrie, teneur en eau, limites d'Atterberg), ont permit de mettre en évidence des sols fins à très fin.
- L'indice de plasticité, montre un sol très plastique selon la classification USCS des sols fins.
- Les valeurs de gonflement montrent une grande sensibilité à l'eau de ces sols.
- Les résultats des analyses chimiques obtenus, montrent la présence des gypses marquée par les sulfates.
- Le matériau étudie contient un pourcentage important de carbonate. Selon la norme NFP 094-48 qui est basé sur la classification des sols selon le pourcentage de carbonate, notre matériau a été classé comme un matériau peu calcaire.
- L'indice CBR obtenue, montrent de sol de faible portance.
- Selon la classification GTR les sols rencontrés, sur la section entre Seghouane et Moudjebeur, sont en générale de classe A et sous classes A3.
- La classe de portance des sols support serait la classe S4. C'est la classe la plus faible.
- La construction des chaussées du réseau principal de niveau 1 nécessite un sol support de classe minimale S2. Un sur classement des sols-supports S4 vers une classe S2 à l'aide d'une couche de forme est donc requis.
- Le renforcement de chaussée a été nécessaire afin de réduire le tassement et augmenté la durée de vie de l'ouvrage.

# CHAPITRE V

## MODELISATION NUMERIQUE DU CORPS DE CHAUSSEE RENFORCE

## V.1. Introduction:

Dans le cadre de ce travail, nous avons donc choisi d'étudier la déformation de corps de chaussé souple, pour cela notre étude consiste à modéliser le corps de chaussée souple neuf renforcé par géotextile en utilisant le code de calcul «plaxis2d» pour mener une simulation et un calcul en éléments finis, ensuite faire une comparaison de résultats en considérant séparément les cas avec et sans renforcement.

Dans une première partie de cette analyse, après une présentation succincte de l'expérimentation, un modèle numérique en éléments finis de référence réalisé avec «plaxis2d» est proposé pour d'écrire le comportement de cet ouvrage, ensuite faire une comparaison des résultats en considérant séparément les cas avec et sans renforcement. Après en va faire une étude pour déterminer la meilleure position de géotextile, et a la fin en considère 4 modèles variante a partir de modèle de référence pour déterminer le modèle qui donne la minimum valeur de déplacement vertical.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à une étude paramétrique basée sur les paramètres de référence de cet ouvrage, consiste à analyser l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement de chaussée souple renforcé par géotextile. Cette analyse concerne la sensibilité de la déformation de la chaussée aux paramètres du modèle pour le modèle de Mohr-Coulomb.

L'ensemble des résultats de simulation dans cette étude sont présentées sous forme des tableaux et courbes graphique et sont largement discutée.

## V.2. Impact de la roue charge de calcul:

Dans une route, les charges qui sont prises en compte dans le dimensionnement sont les charges transmises par les poids lourds, car l'effet des véhicules légers est très faible (le dommage d'un seul poids lourd représente environ le dommage provoqué par un million de véhicules légers). Les charges sont transmises par les essieux. Chaque essieu est composé de part et d'autre de deux roues jumelées. Mais la distance qui sépare les deux paires de roues jumelées est assez importante (environ 2 m) ce qui rend toute interférence d'efforts très négligeable. En fait, il y a lieu d'examiner l'effet de chaque paire de roues jumelées séparément. Aussi la distance qui sépare les deux roues jumelées est assez faible, ce qui permet d'admettre qu'on peut assimiler les deux roues jumelées à une roue équivalente, déterminée par son impact sur la chaussée et la pression de contact.

## V.3. Chargement:

L'essieu de référence est l'essieu isolée a roue simple de 130 KN, pour le calcul des contraintes et déformations sous l'essieu de référence de 130 KN, le Guide Technique de Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée (1994) considère que chaque demi-essieu comporte un jumelage à roues simples, représenté par deux charges exerçant une pression uniformément répartie de 0,662 MPa sur 2 disques de 0,125 m de rayon, avec un entre-axe de 0,375 m (figure V.1). [13]

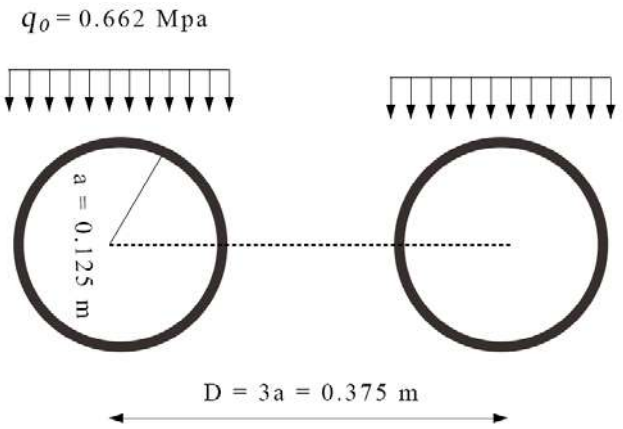



**Figure V.1:** Principe d'application des charges [13]

## V.4. Données géométriques du modèle:

La (figure V.2) représente le modèle proposé pour la modélisation numérique pour cette étude. Le modèle a une hauteur de 2.97m et une largeur de 7m avec une couche de fondation GNT de 60cm, et deux couches de base GB de 15cm et 14cm, et une couche de roulement BB de 8cm, la largeur de géotextile à partir de l'extrémité de chaque couche de la chaussée. On prend en considération uniquement deux nappes de renforcement, l'une sous la base de la couche de fondation, et la seconde sous la base de la première couche de base.

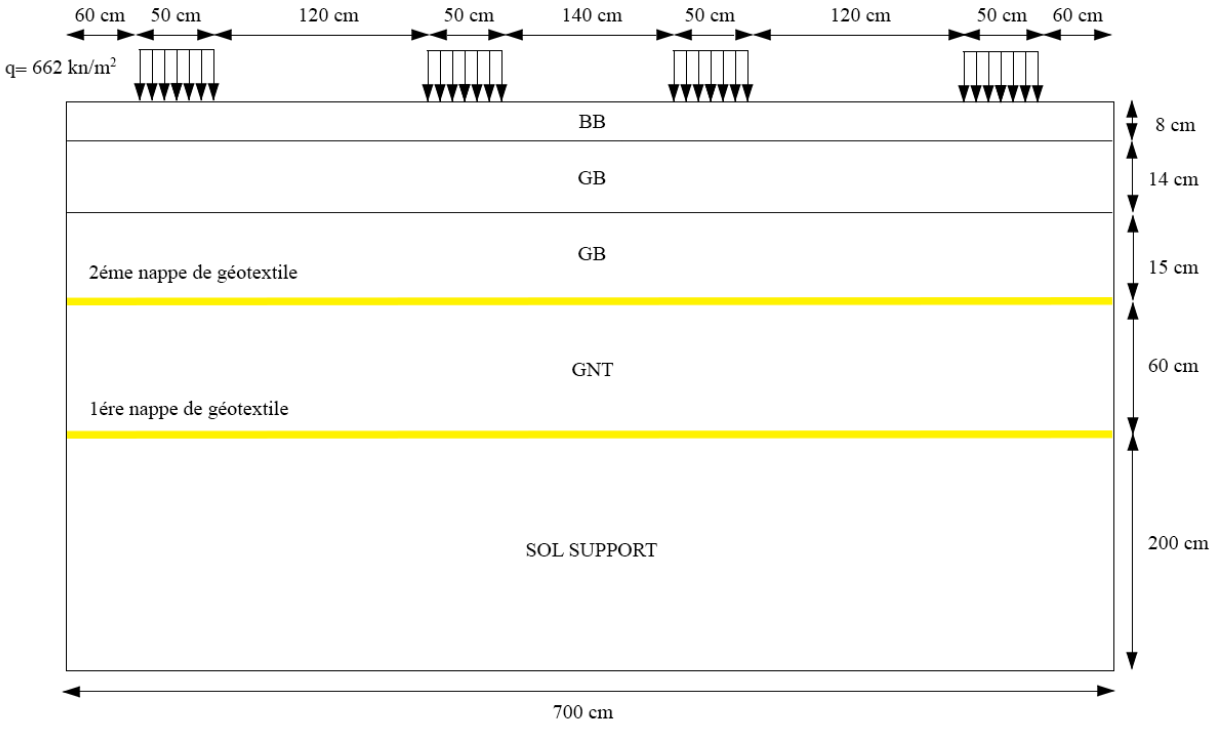



**Figure V.2:** Présentation du cas étudié

| Point | X(m) | Y(m) | Point | X(m) | Y(m) | Point | X(m) | Y(m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 8 | 7 | 2.75 | 16 | 0.6 | 2.97 |
| 1 | 7 | 0 | 9 | 0 | 2.75 | 17 | 1.1 | 2.97 |
| 2 | 7 | 2.97 | 10 | 7 | 2.89 | 18 | 2.3 | 2.97 |
| 3 | 0 | 2.97 | 11 | 0 | 2.89 | 19 | 2.8 | 2.97 |
| 4 | 7 | 2 | 12 | 5.9 | 2.97 | - | - | - |
| 5 | 0 | 2 | 13 | 6.4 | 2.97 | - | - | - |
| 6 | 7 | 2.6 | 14 | 4.2 | 2.97 | - | - | - |
| 7 | 0 | 2.6 | 15 | 4.7 | 2.97 | - | - | - |

**Tableau V.1:** Les cordonnées de La géométrie

## V.5. Propriétés des matériaux du modèle:

Les propriétés physique et mécanique des matériaux utilisés dans cette simulation sont présentées dans le tableau suivant :

| Paramètre | Sol support | GNT | GB | BB |
|---|---|---|---|---|
| $\gamma_{unsat}$ (kn/m²) | 16.4 | 21 | 22 | 24 |
| $\gamma_{sat}$ (kn/m²) | 20.18 | 21 | - | - |
| Perméabilité (m/jour) | $1*10^{-3}$ | $1*10^{-3}$ | - | - |
| Modèle de matériaux | Mohr-coulomb | Mohr-coulomb | linear elastic | linear elastic |
| Drainage | drained | drained | Non-porous | Non-porous |
| Module d'élasticité (kn/m²) | 8330 | $6*10^{5}$ | $9.3*10^{6}$ | $5.4*10^{6}$ |
| Coefficient de poisson ν (nu) | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| Créf (kn/m²) | 34 | 1 | - | - |
| φ (°) | 20 | 30 | - | - |
| Ψ (°) | 0 | 0 | - | - |

**Tableau V.2:** Caractéristiques physique et mécanique de déférentes couches de chaussée

Les géotextiles utiliser son des géotextiles non-tissé de type ALVEOTER® AFITEX avec les propriétés résumé dans le tableau suivante :

| Module de YOUNG (kn) | résistance à la traction (N) | Section (m²) | EA (kn/m) |
|---|---|---|---|
| $2 X 10^{6}$ | 5000 | $2 X 10^{-4}$ | 400 |

**Tableau V.3:** Propriété du géotextile non-tissé de type ALVEOTER® AFITEX

## V.6. Maillage:

Lorsque le modèle de géométrie est entièrement défini et que les propriétés du matériau sont attribuées à tous les clusters et objets structuraux, la géométrie doit être divisée en éléments finis afin d'effectuer des calculs d'éléments finis. Une composition d'éléments finis s'appelle une maille. Le type de base de l'élément dans un maillage est l'élément triangulaire à 15 nœuds ou l'élément triangulaire à 6 nœuds, l'élément choisi dans cette étude est le triangle à 15 nœuds qui fournit une interpolation du quatrième ordre pour les déplacements et une intégration numérique qui se fait sur douze points de Gauss (points de contrainte).

PLAXIS permet une génération de maille entièrement automatique de mailles à éléments finis. La génération du maillage est basée sur une procédure de triangulation robuste, qui se traduit par des maillages «non structurés». Ces mailles peuvent sembler désordonnées, mais la performance numérique de ces mailles est habituellement meilleure que pour les maillages réguliers (structurés).

a) b)

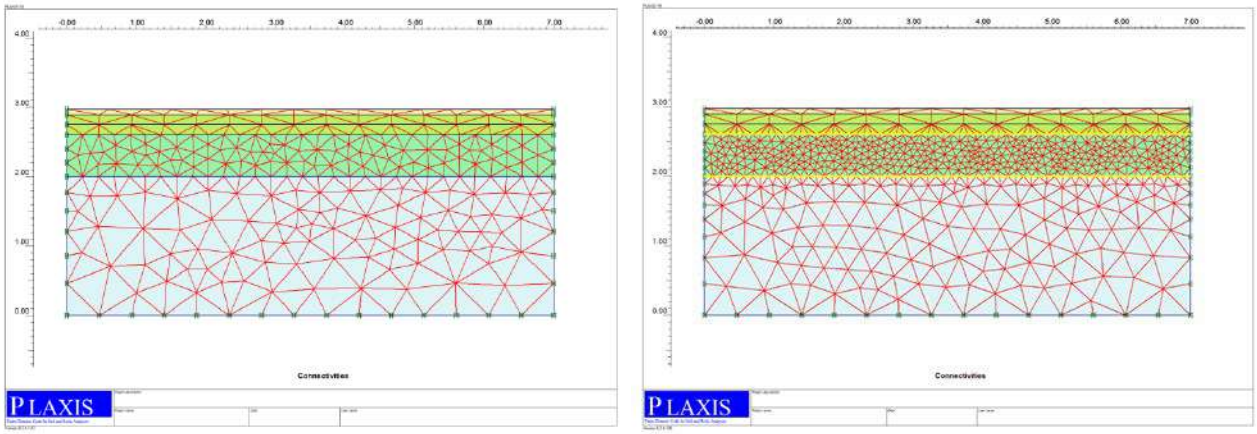



**Figure V.3:** Génération du maillage. a) sans renforcement ; b) avec renforcement

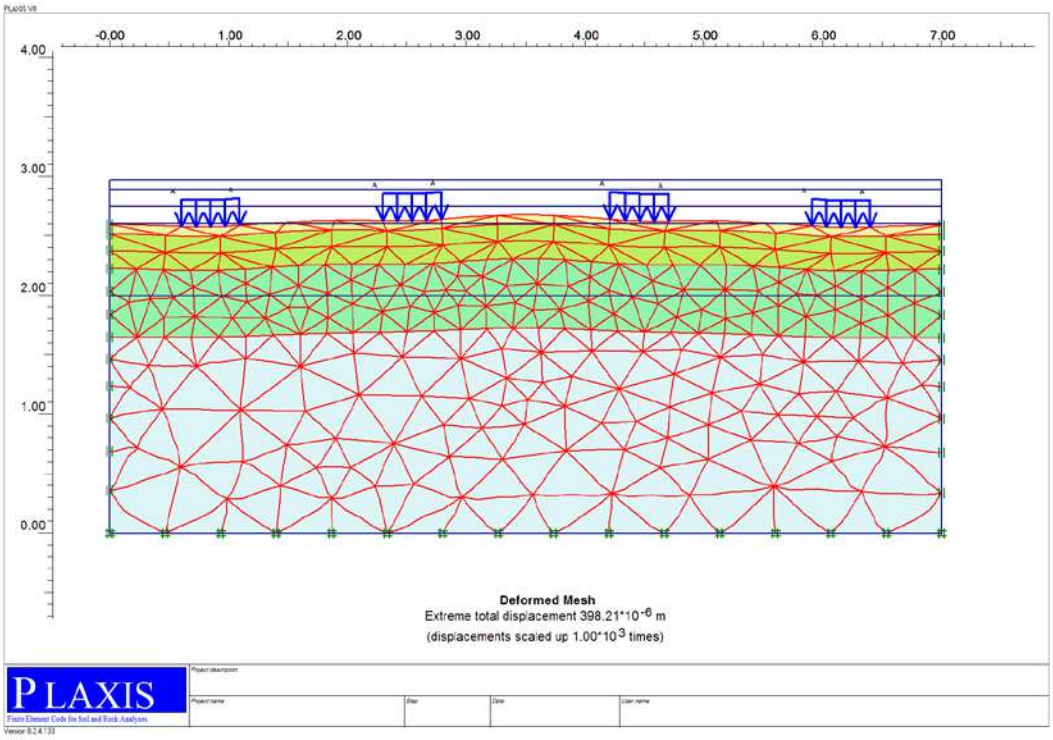
## V.7. Condition initiale:

Les conditions initiales nécessitent la génération des contraintes initiales, pour les calcules des contraintes initiales il faut désactiver les éléments structuraux ainsi que l'élément de sol crée par défaut au niveau du chaussée, on génère alors les contraintes initiales en prenant les valeurs de $K_0$ par défaut, la valeur de $K_0$ est proposé automatiquement d'après la formule de Jaky, on garde le poids du sol à 1 ce qui correspondant à une application totale de la gravité.

## V.8. Présentation des résultats du modèle de référence:

Les différents résultats obtenues de maillage déformé, déplacement vertical et contraint totale du chaussé souple sans et avec renforcement sous l'effet de placement des charges statique sont présentés sur les Figures (V.4; V.5 ; V.6).

a)




b)

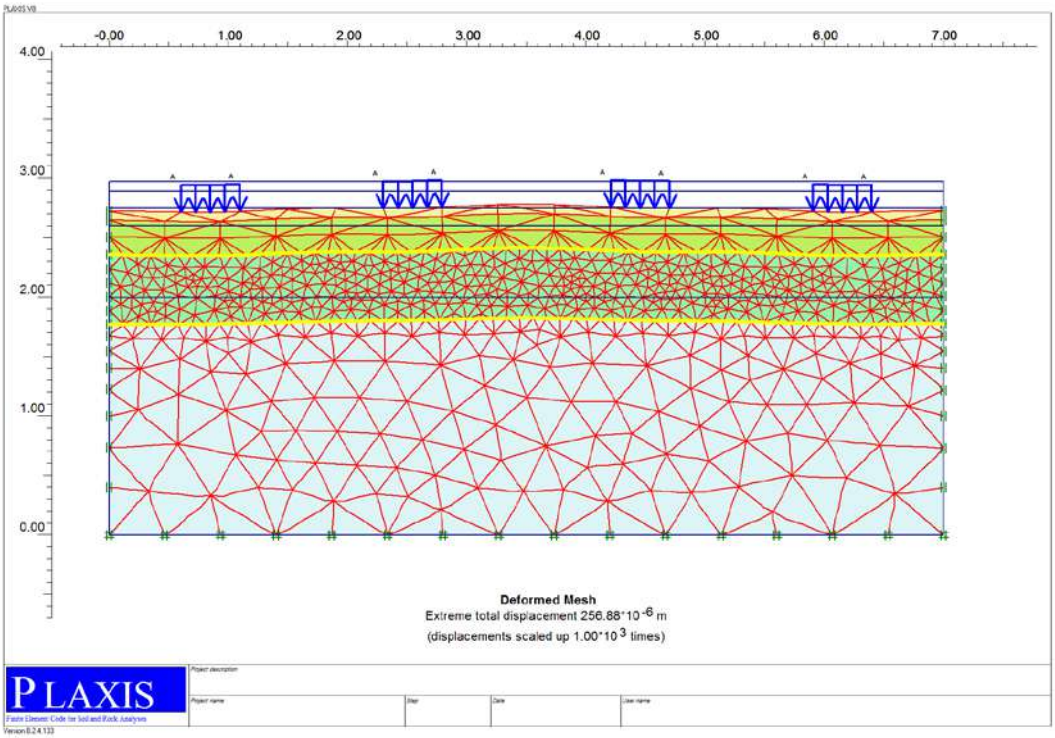
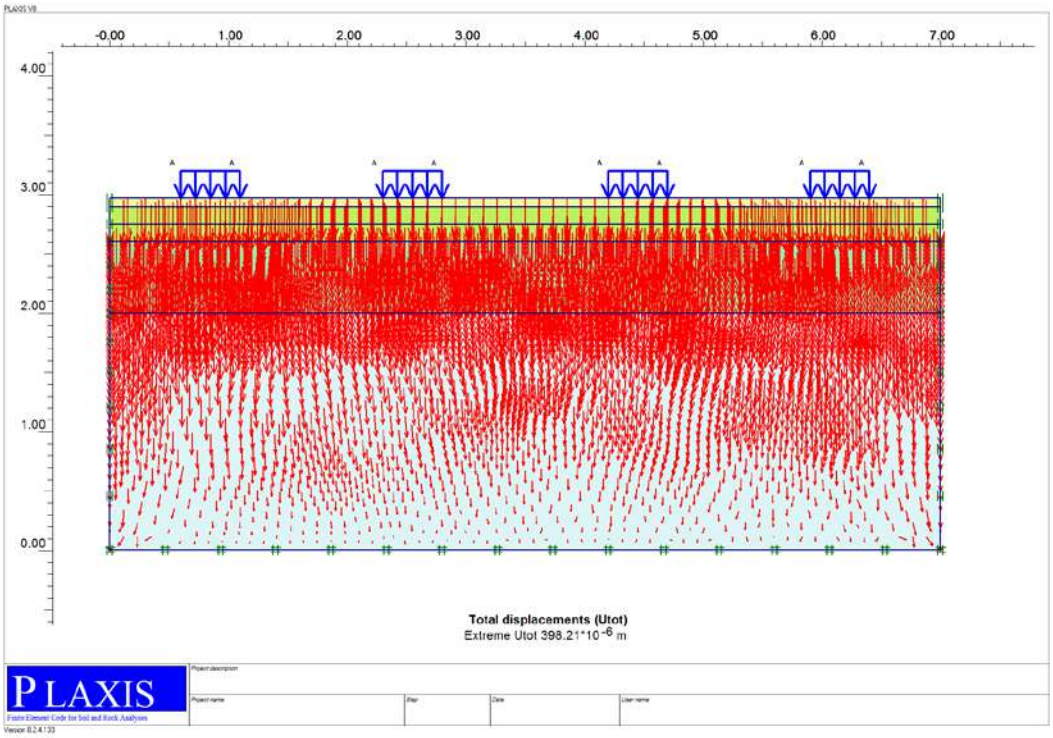



**Figure V.4:** Déformation du maillage. a) sans renforcement ; b) avec renforcement

a)




b)

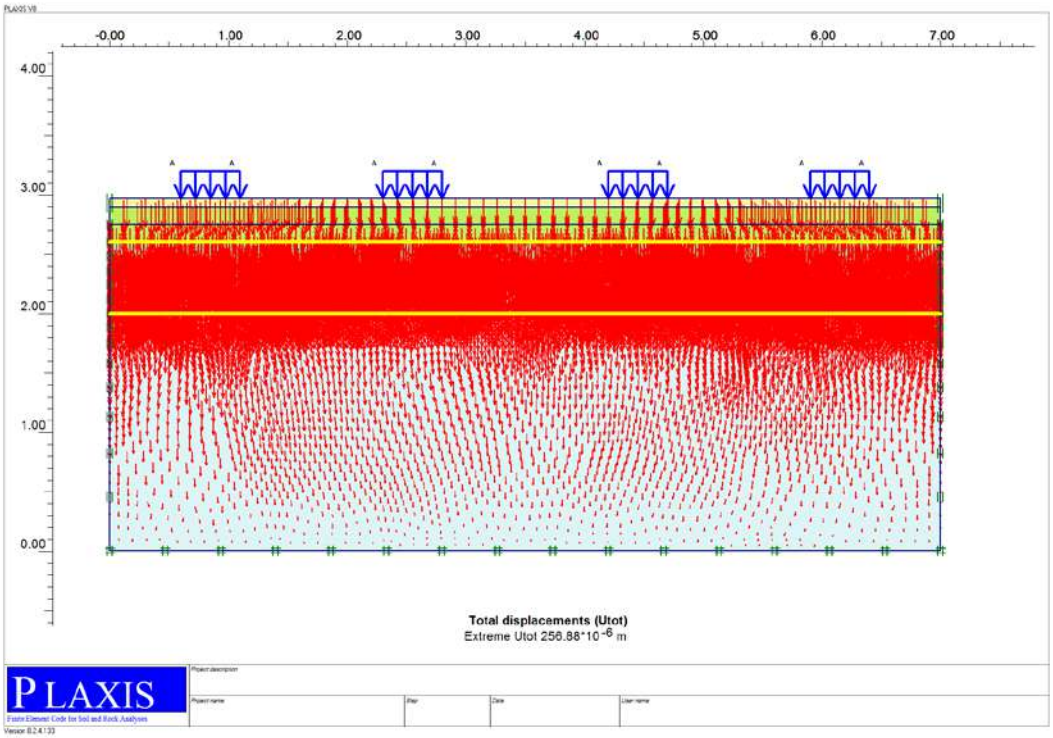



**Figure V.5:** Déplacement vertical. a) sans renforcement ; b) avec renforcement

a)

b)

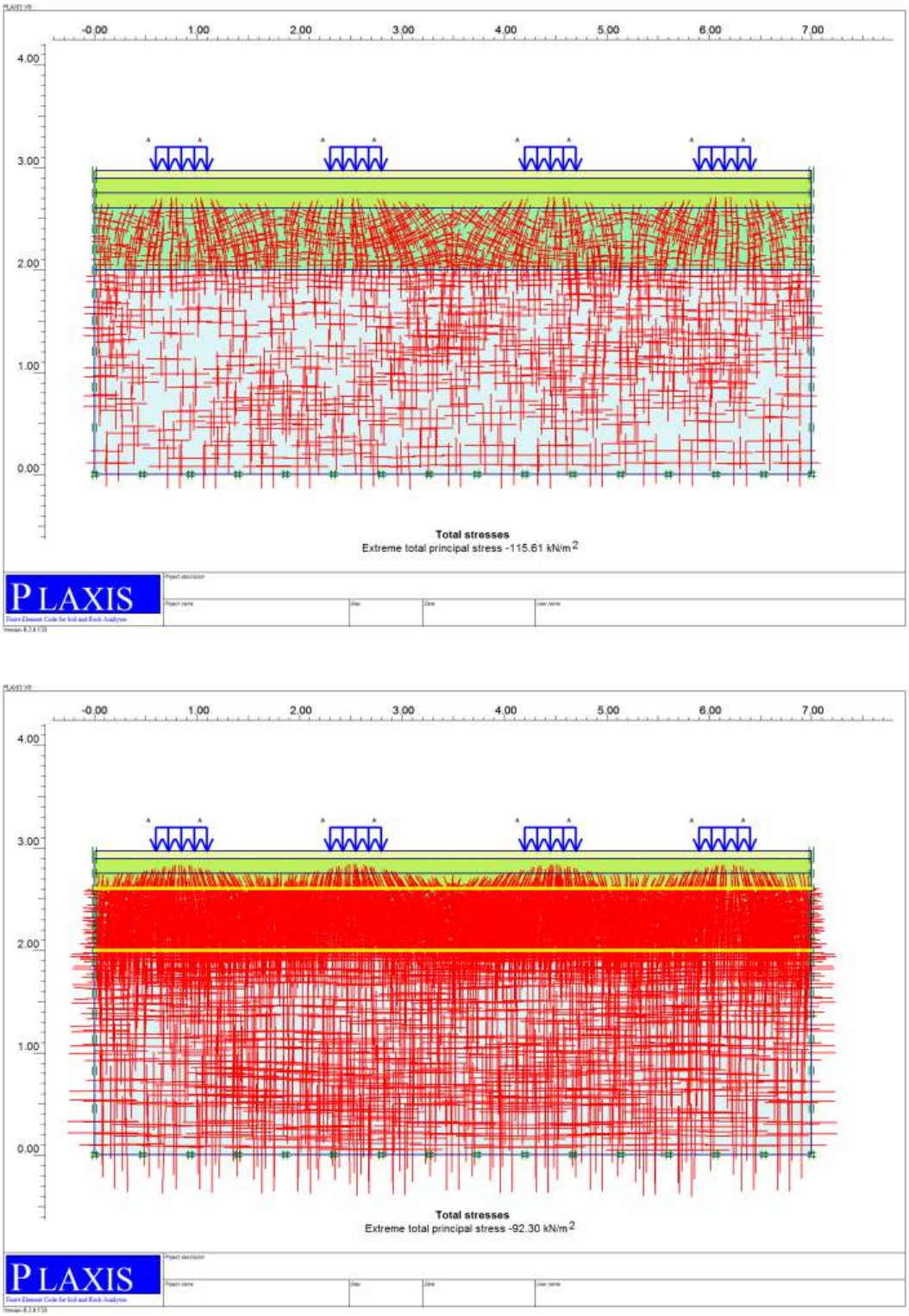



**Figure V.6:** Contrainte totale. a) sans renforcement ; b) avec renforcement

Le (tableau V.4) compare les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale sans et avec renforcement calculées par le code Plaxis.

| | Déplacement vertical (m) | Contrainte totale (kn/m²) |
|---|---|---|
| Sans renforcement | $398.21*10^{-6}$ | -115.61 |
| Avec renforcement | $256.88*10^{-6}$ | -92.30 |

**Tableau V.4:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale (sans et avec renforcement)

La figure (V.7) montre le comportement du chaussé souple des 2 cas possibles, chaussée non renforcée et chaussée renforcée sous l'effet de placement des charges statique.

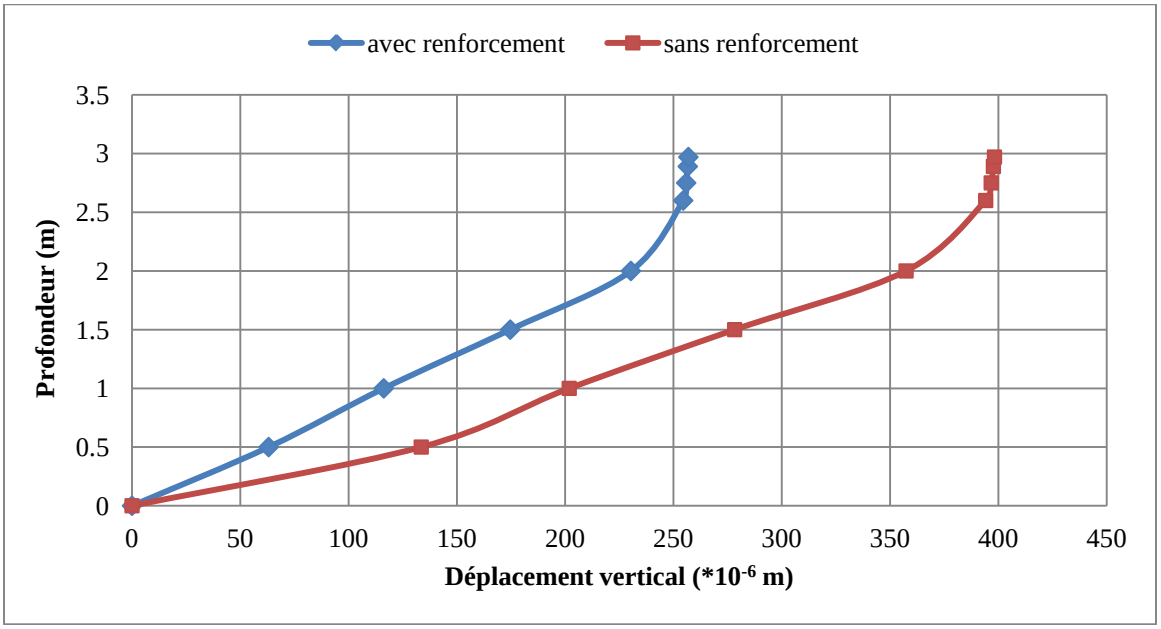



**Figure V.7:** Déplacement vertical en fonction de profondeur (sans et avec renforcement)

D'après les résultats obtenus on constate qu'il y a une grande diminution dans la valeur de déplacement vertical de chaussée renforcé ($256.88*10^{-6}$ m) par rapport aux chaussée non renforcé ($398.21*10^{-6}$ m). Par contre la contrainte totale à augmenter de (-115.61 kn/m²) à (-92.30 kn/m²).
Donc on peut conclure que la présence du renforcement a une influence significative sur le comportement d'une chaussée souple dans un système élastique.

## V.9. L'effet de déférentes positions de la nappe de géotextile:

Dans cette partie on va utilisé une seul nappe de renforcement pour déterminer la meilleur positionnement de géotextile qui donne la minimum valeur de déplacement vertical, on a considérer 4 déférent position, la premier position entre le sol support et la couche de GNT à 2m, la deuxième aux milieux de la couche de GNT à 2.3m, la troisième entre la couche de GNT et la première couche de GB à 2.6m et le quatrième position entre la première et la deuxième couche de GB à 2.75m. Le (tableau V.5) et la (figure V.8) résume les principaux résultats obtenus de déplacement vertical et contraint total ainsi que le déplacement vertical en fonction de la profondeur de déférentes positions.

| | Déplacement vertical (m) | Contrainte total (kn/m²) |
|---|---|---|
| 1ére position | $257.02 * 10^{-6}$ | -92.30 |
| 2éme position | $265.78 * 10^{-6}$ | -94.34 |
| 3éme position | $265.54 * 10^{-6}$ | -94.36 |
| 4éme position | $265.43 * 10^{-6}$ | -94.35 |

**Tableau V.5:** Résultats des déplacements verticaux et contraints totaux de déférentes positions

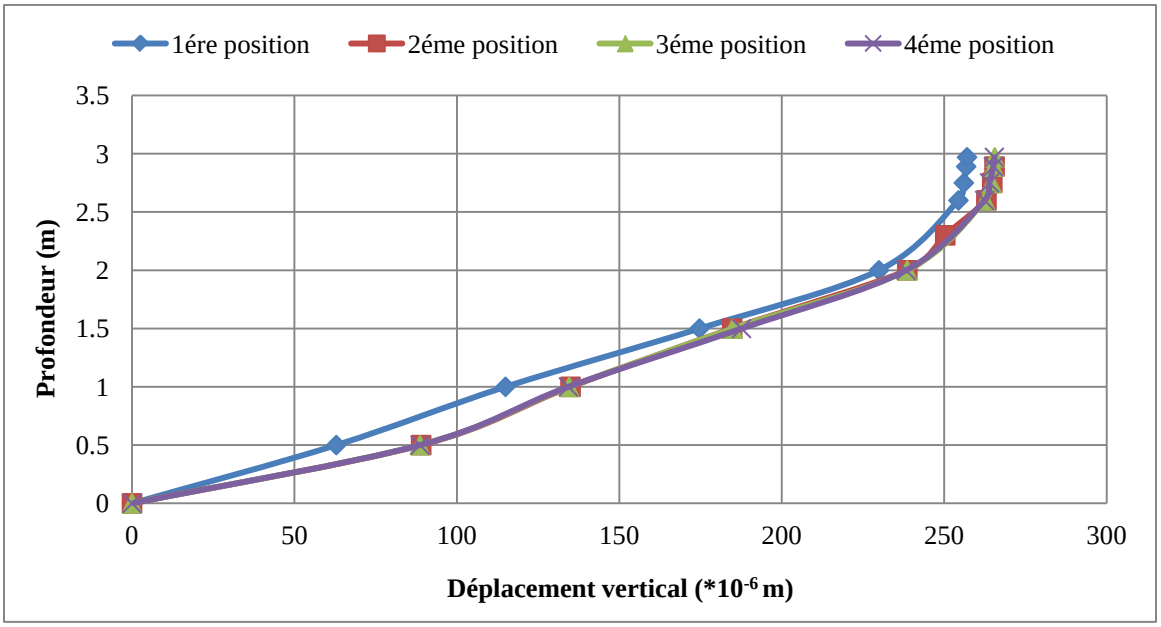



**Figure V.8:** Déplacement vertical en fonction de profondeur de déférentes positions

D'après le tableau (V.5) et la figure (V.8), on peut dire que la meilleure position de géotextile qui donne la minimum valeur de déplacement vertical est la première position ($257.02*10^{-6}$ m) lorsque le géotextile est intercalé directement entre le sol support et la couche de fondation GNT. Si qu'on peut remarque aussi, les trois autres positions ont presque la même valeur de déplacement vertical c'est-a-dire lorsque

le géotextile est placé aux milieux de la couche de GNT ou sous la première ou la deuxième couche de GB l'effet de renforcement est le même. Pour les valeurs de contraint total il y a une faible variation, elles sont confinées entre (-92.30 kn/m²) et (-94.36 kn/m²).

## V.10. Expérimentation des modèles variantes:

Dans cette partie on va expérimenter 4 modèles variante a partir de modèle de référence pour voir l'effet des déférents couches de chaussé et pour déterminer le modèle variante qui donne la minimum valeur de déplacement vertical, la première modèle est réduits avec 40% dans la couche de GNT, dans la deuxième modèle on va éliminer la seconde couche de GB, la troisième modèle est réduits avec 40% dans la couche de GNT avec l'élimination de la seconde couche de GB, le quatrième modèle est réduits avec 40% dans la couche de GNT, 25% dans la couche de BB avec l'élimination de la seconde couche de GB, on considère en même tempe dans tous ces cas deux nappes de géotextile la première nappe sous la couche de GNT et la deuxième nappe sous la premier couche de GB, tous les résultats de ces modèles variante sont comparé aux résultats de modèle de référence renforcé.

### V.10.1. Modèle variante n°1:

Dans ce cas on a diminué l'épaisseur de la couche de fondation GNT avec (24 cm), on a obtenue un déplacement vertical de ($280.21*10^{-6}$ m) et un contraint total de (-89.58 kn/m²). (Figure V.9)

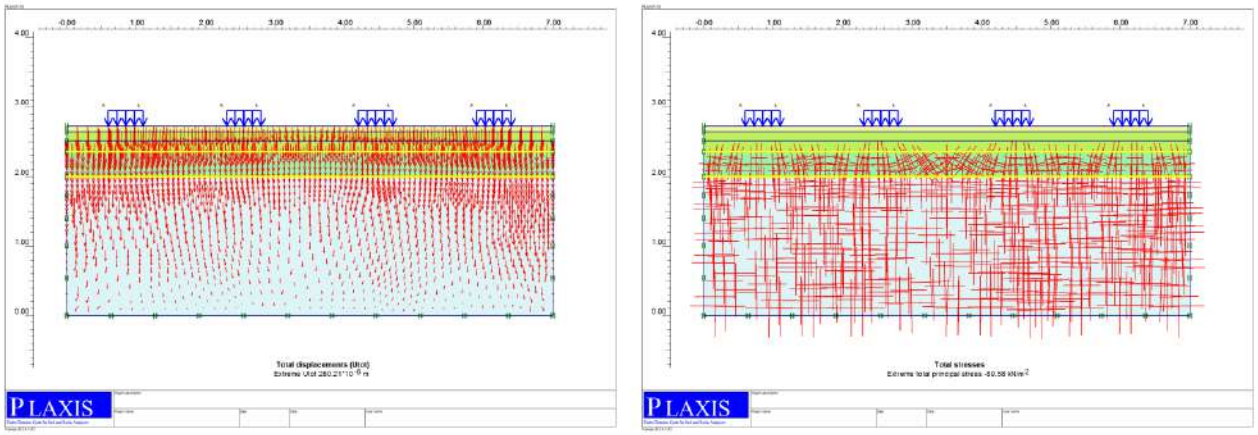



**Figure V.9:** Résultats de déplacement vertical et contraint total de modèle variante 1

| | Déplacement vertical (m) | Contrainte totale (kn/m²) |
|---|---|---|
| Modèle de référence | $256.88*10^{-6}$ | -92.30 |
| Modèle variante n°1 | $280.21*10^{-6}$ | -89.58 |

**Tableau V.6:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale de modèle de référence et modèle variante n°1

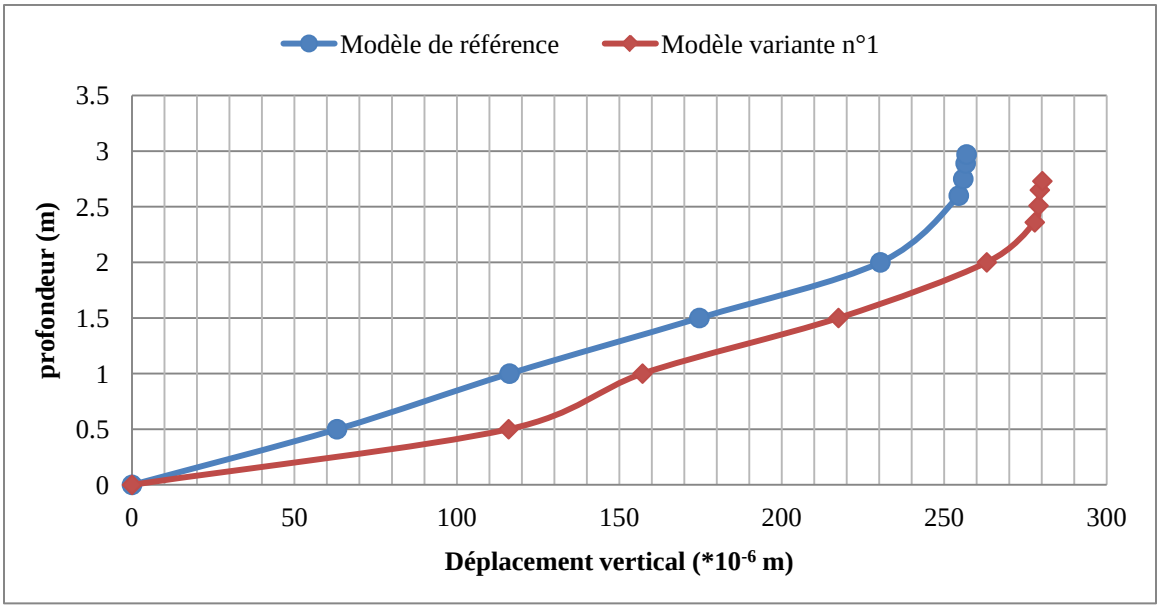



**Figure V.10:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical en fonction de profondeur de modèle de référence et modèle variante n°1

Le tableau (V.6) et la figure (V.10) montre une augmentation dans la valeur de déplacement vertical ($280.21*10^{-6}$ m) par rapport aux modèle de référence ($256.88*10^{-6}$ m), la valeur de contraint total a également augmenté (-89.58 kn/m²) par rapport aussi aux modèle de référence (-92.30 kn/m²), donc on peut dire que l'effet de la couche de fondation GNT est assez important dans notre chaussé souple.

## V.10.2. Modèle variante n°2:

Dans ce cas on a éliminé la deuxième couche de base GB (14 cm), on a obtenue un déplacement vertical de ($311.21*10^{-6}$ m) et un contraint total de (-91.17 kn/m²). (Figure V.11)

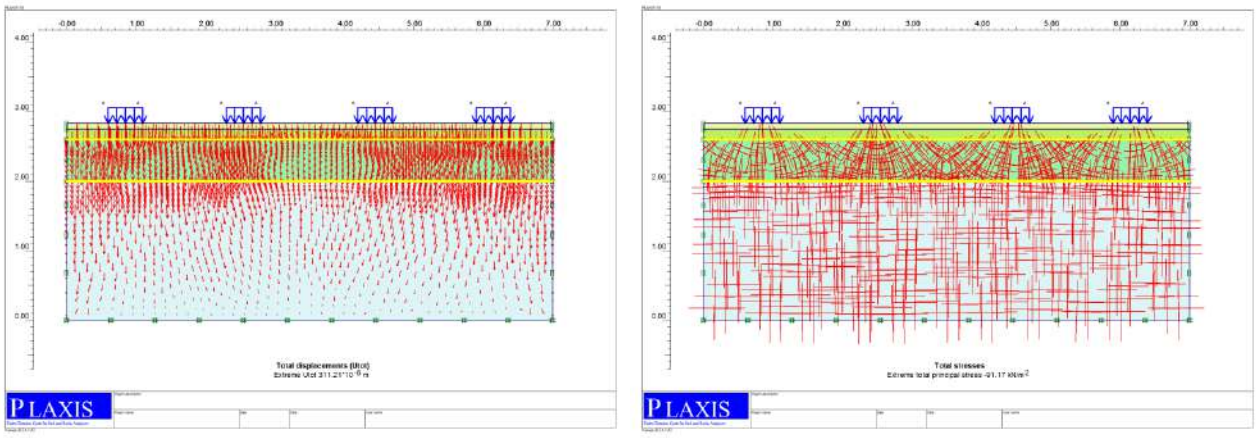



**Figure V.11:** Résultats de déplacement vertical et contraint total de modèle variante 2

| | Déplacement vertical (m) | Contrainte totale (kn/m²) |
|---|---|---|
| Modèle de référence | $256.88*10^{-6}$ | -92.30 |
| Modèle variante n°2 | $311.21*10^{-6}$ | -91.17 |

**Tableau V.7:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale de modèle de référence et modèle variante n°2

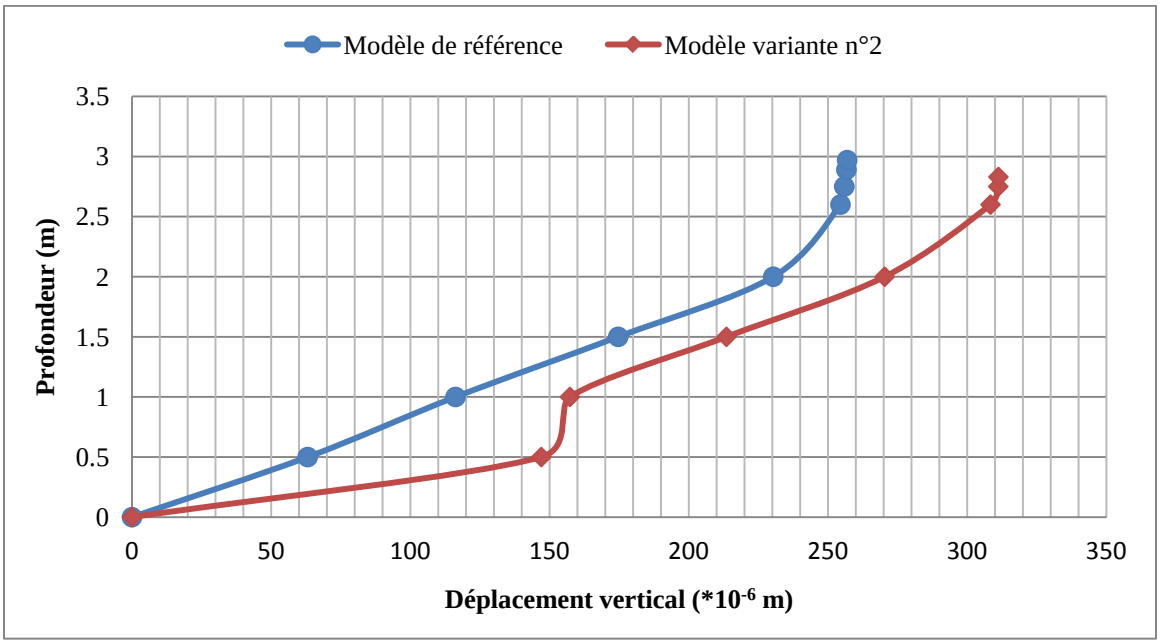



**Figure V.12:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical en fonction de profondeur de modèle de référence et modèle variante n°2

D'après le tableau (V.7) et la figure (V.12) il y a une augmentation remarquable entre la valeur de déplacement vertical de modèle variante n°2 ($311.21*10^{-6}$ m) et le modèle de référence ($256.88*10^{-6}$ m), pour la valeur de contrainte total il y a une faible augmentation (-91.17 kn/m²) par rapport aux modèle de référence (-92.30 kn/m²), donc vu ces résultats, le rôle de la deuxième couche de base GB est significative dans notre chaussée souple puis que le comportement de géotextile dans ce cas n'est pas idéal.

## V.10.3. Modèle variante n°3:

Dans ce cas on a diminué l'épaisseur de la couche de fondation GNT avec (24 cm), puis on a éliminé la deuxième couche de base GB (14 cm), on a obtenue un déplacement vertical de ($168.81*10^{-6}$ m) et un contraint total de (-65.02 kn/m²). (Figure V.13)

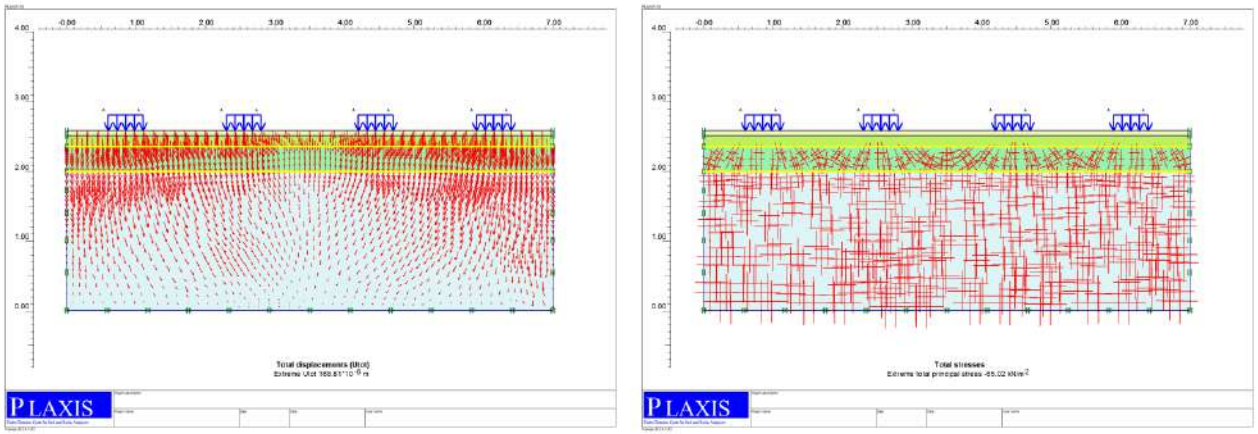



**Figure V.13:** Résultats de déplacement vertical et contraint total de modèle variante 3

| | Déplacement vertical (m) | Contrainte totale (kn/m²) |
|---|---|---|
| Modèle de référence | $256.88*10^{-6}$ | -92.30 |
| Modèle variante n°3 | $168.81*10^{-6}$ | -65.02 |

**Tableau V.8:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale de modèle de référence et modèle variante n°3

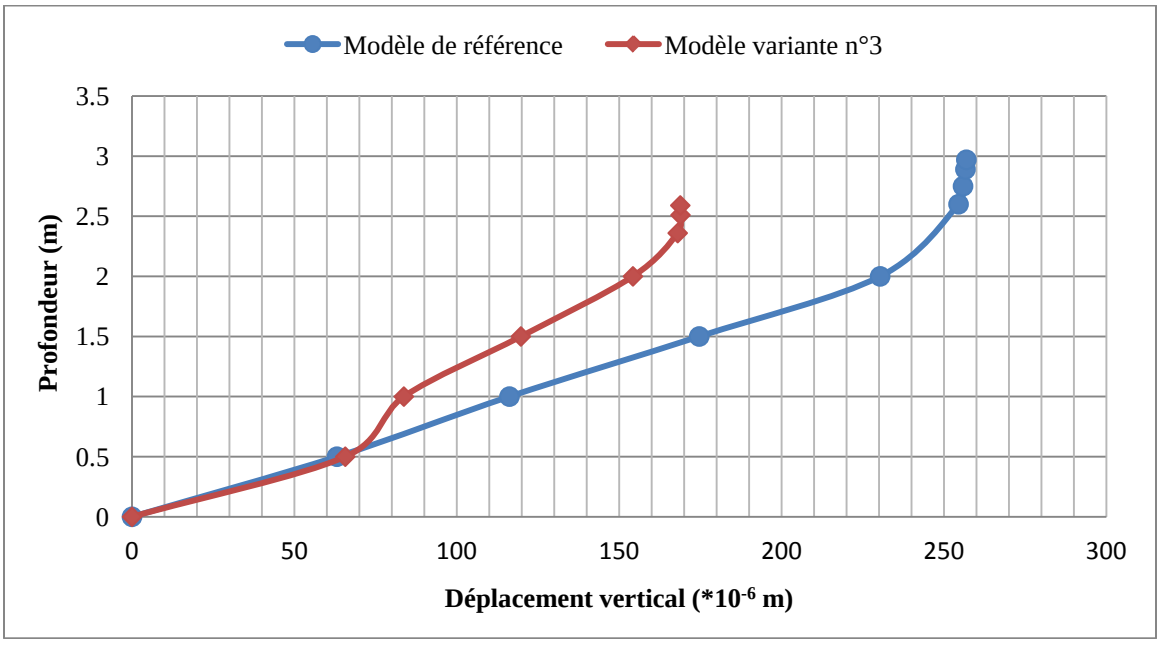



**Figure V.14:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical en fonction de profondeur de modèle de référence et modèle variante n°3

A partir de tableau (V.8) et la figure (V.14) il y a une grande réduction dans la valeur de déplacement vertical ($168.81*10^{-6}$ m) par rapport aux modèle de référence ($256.88*10^{-6}$ m), par contre la valeur de contraint totale à déplacé de (-92.30 kn/m²) dans le modèle de référence à (-65.02 kn/m²) dans le modèle variante n°3. Donc on peut dire que lorsque la diminution dans la couche de fondation GNT est accompagnée avec une élimination de la deuxième couche de base GB, notre corps de chaussée donne une valeur de déplacement plus petite aux cela obtenue dans le modèle de référence.

## V.10.4. Modèle variante n°4:

Dans cette cas finale on a diminué l'épaisseur de la couche de fondation GNT avec (24 cm) et la couche de roulement BB avec (2 cm), puis on a éliminé la deuxième couche de base GB (14 cm), on a obtenue un déplacement vertical de ($175.25*10^{-6}$ m) et un contraint total de (-64.80 kn/m²). (Figure V.15)

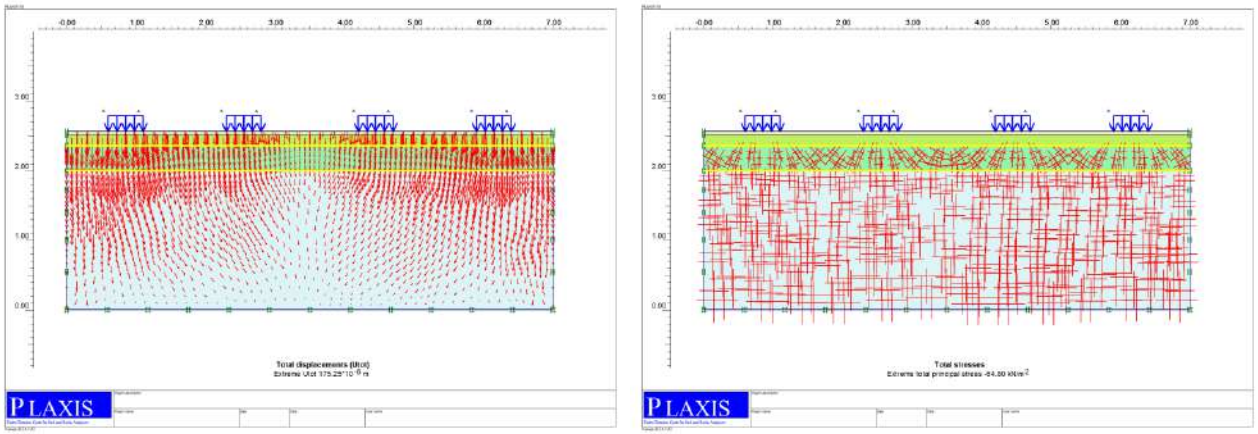



**Figure V.15:** Résultats de déplacement vertical et contraint total de modèle variante 4

| | Déplacement vertical (m) | Contrainte totale (kn/m²) |
|---|---|---|
| Modèle de référence | $256.88*10^{-6}$ | -92.30 |
| Modèle variante n°4 | $175.25*10^{-6}$ | -64.80 |

**Tableau V.9:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale de modèle de référence et modèle variante n°4

Le déplacement qu'on a obtenue dans ce cas ($175.25*10^{-6}$ m) est très proche aux cela obtenue dans le modèle variante n°3 ($168.81*10^{-6}$ m) avec une petit augmentation due à la diminution dans la couche de roulement BB, mais il reste toujours une grande déférence par rapport aux modèle de référence ($256.88*10^{-6}$ m), la valeur de contrainte totale est comme les modèles précédent à augmenté (-64.80 kn/m²) par rapport aux modèle de référence (-92.30 kn/m²), donc on peut dire que l'effet de la couche de roulement BB est assez important dans notre chaussé souple.

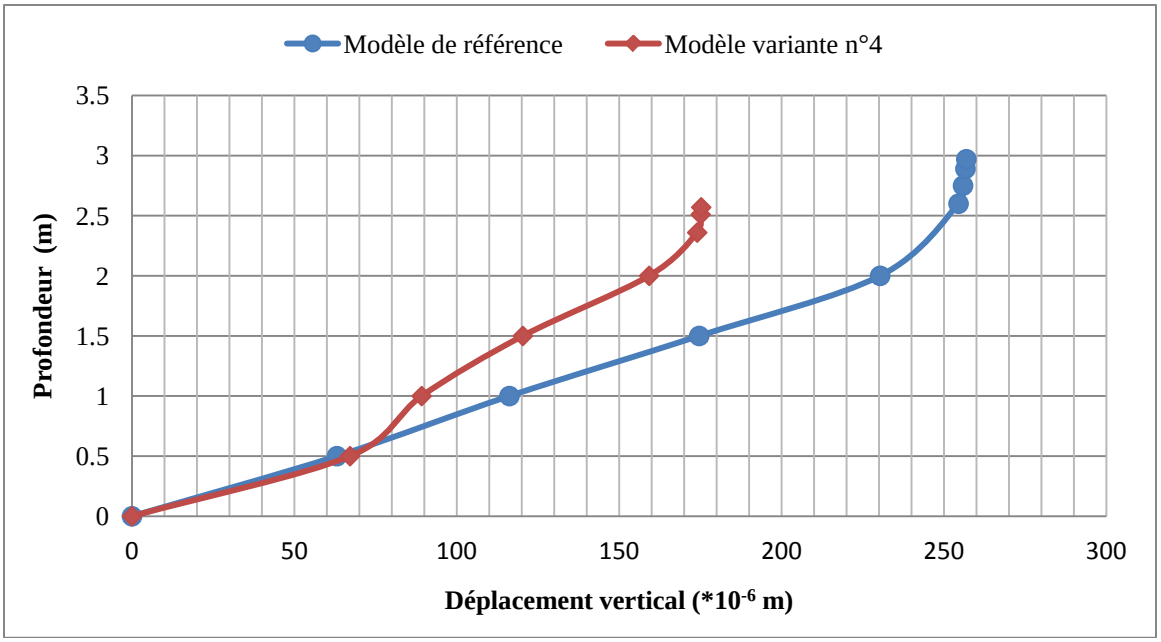



**Figure V.16:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical en fonction de profondeur de modèle de référence et modèle variante n°4

## V.10.5. Comparaison entre les modèles variantes et le modèle de référence:

L'ensemble des résultats des modèles variantes sont présenté dans la figure et tableau au dessous.

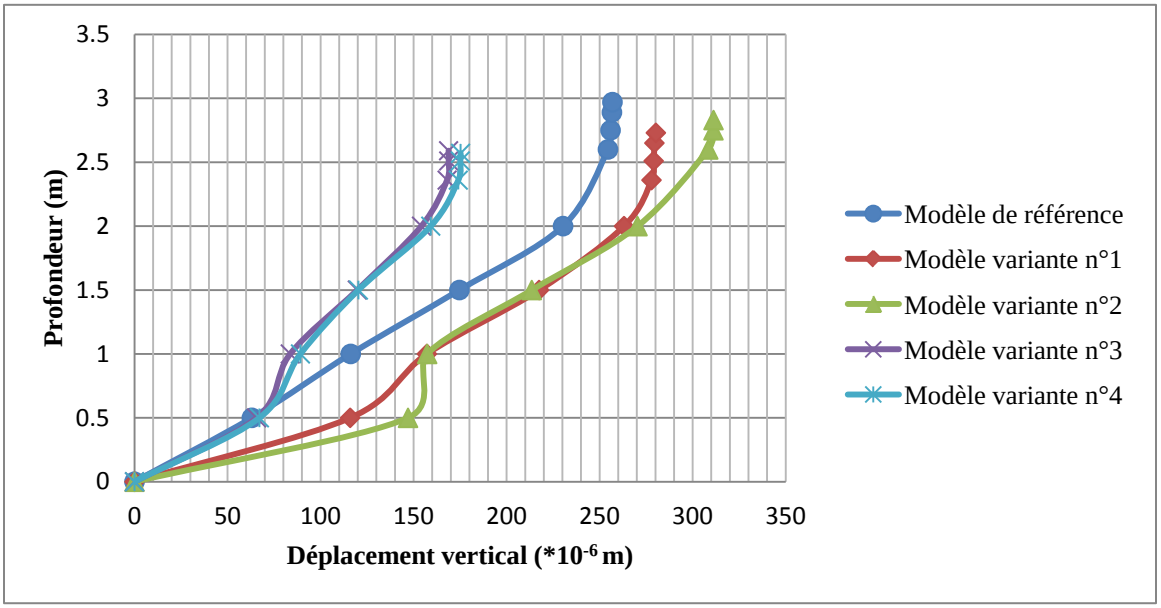



**Figure V.17:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical en fonction de profondeur de modèle de référence et les 4 modèles variantes

| | Déplacement vertical (m) | Contrainte totale (kn/m²) |
|---|---|---|
| Modèle de référence | $256.88*10^{-6}$ | -92.30 |
| Modèle variante n°1 | $280.21*10^{-6}$ | -89.58 |
| Modèle variante n°2 | $311.21*10^{-6}$ | -91.17 |
| Modèle variante n°3 | $168.81*10^{-6}$ | -65.02 |
| Modèle variante n°4 | $175.25*10^{-6}$ | -64.80 |

**Tableau V.10:** Comparaison entre les valeurs de déplacement vertical et contrainte totale de modèle de référence et les 4 modèles variantes

Pour le modèle variante n°1 et n°2 nous avons obtenue un déplacement vertical de ($280.21*10^{-6}$ m) et ($311.21*10^{-6}$ m) respectivement ces valeurs est en comparaison avec le modèle de référence il y a une augmentation important surtout pour le modèle variante n°2, cela est lié principalement à la diminution de la couche de GNT pour le modèle variante n°1 et l'élimination de la deuxième couche de GB pour le modèle variante n°2. Aux contraire pour le modèle variante n°3 et n°4 les déplacements verticaux sont diminue d'une façon considérable ($168.81*10^{-6}$ m) et ($175.25*10^{-6}$ m) par rapport aux modèle de référence, ces grand réduction se produire lorsque on a diminué la couche de fondation GNT est éliminer la deuxième couche de base GB pour le modèle réduit n° 3, la même chausse pour le modèle variante n° 4 mais avec une autre diminution dans la couche de Roulement BB.
Pour les valeurs des contraintes totales elles sont très proches aux modèle de référence pour le modèle variante n°1 et n°2, mais par rapport aux même modèle il y a une grand augmentation pour le modèle variante n°3 et n°4.

## V.11. Étude paramétrique:

On peut utiliser notre modèle pour faire une troisième étude qui est l'étude paramétrique. On va montrer l'effet des paramètres sur la déformation de chaussé souple renforcé. On utilise le même corps de chaussée, avec les mêmes données et on change à chaque fois le paramètre à comparer, et toujours dans des fourchettes raisonnables.
L'étude de l'influence des paramètres du sol sur les déplacements verticaux du corps de chaussée sous l'effet de placement des charges est menée en faisant varier les cinq paramètres du modèle constitutif (E, $\nu$, $\varphi$, $\psi$, C). Nous faisons varier à chaque fois un des paramètres en gardant constants les autres et cela pour tester l'influence de chaque paramètre sur la déformation de chaussée.

### V.11.1. Effet de la variation de module élastique de sol support:

Pour étudier l'influence de module élastique de sol support une variation du module élastique (de 6000 à 10000 kn/m²) a été analysée.
Les différents résultats obtenus de déplacement vertical de la chaussée sous l'effet de placement des charges sont présentés sur la figure (V.18).

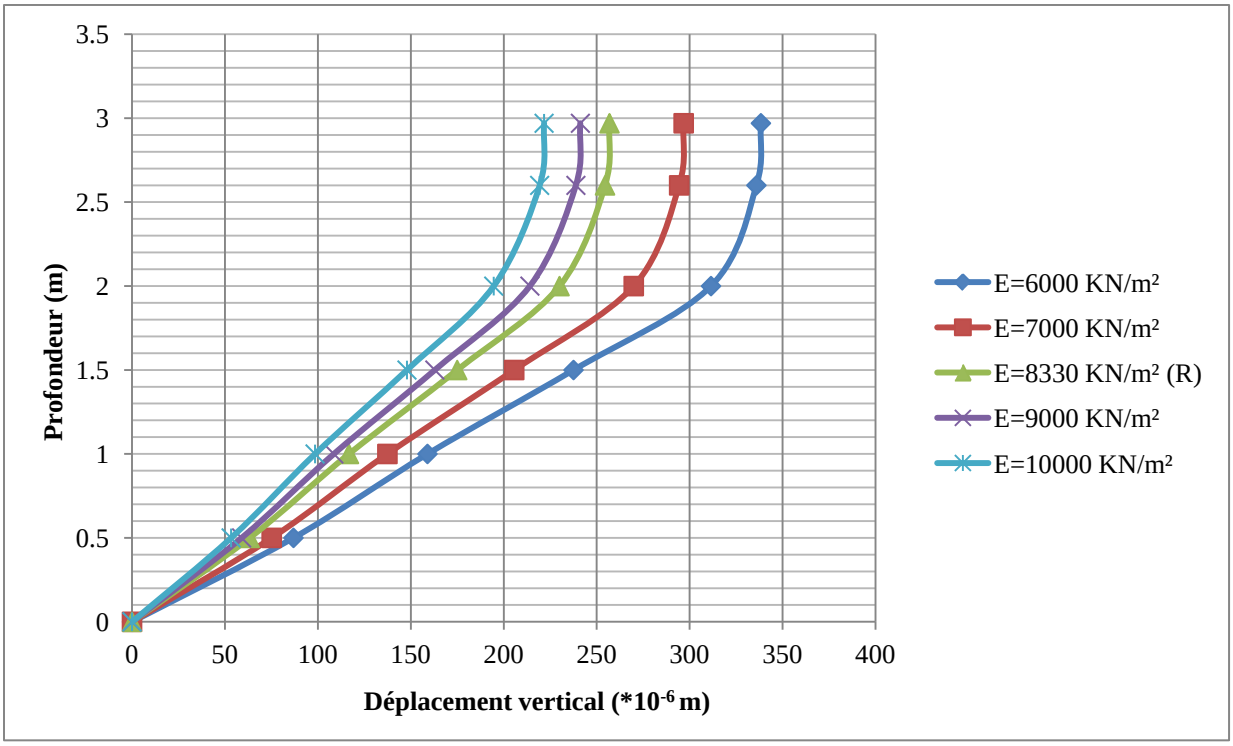



**Figure V.18:** Influence de module d'élasticité du sol support sur les déplacements verticaux de la chaussée

Le tableau suivant présente la comparaison entre les valeurs de déplacement vertical maximal de la chaussée souple sous l'effet de placement des charges calculées pour différents cas étudiés.

| Module d'élasticité (kn/m²) | Déplacements vertical (m) | ΔU/Ur (%) |
|---|---|---|
| 6000 | $338.34*10^{-6}$ | +31.71 |
| 7000 | $296.79*10^{-6}$ | +15.53 |
| 8330 (Valeur de référence) | $256.88*10^{-6}$ | - |
| 9000 | $241.21*10^{-6}$ | -6.10 |
| 1000 | $221.69*10^{-6}$ | -13.69 |

**Tableau V.11:** Influence de module d'élasticité du sol support

Les résultats présentés ci-dessus montrent que le module élastique a une grande influence sur les mouvements verticaux et notamment pour des valeurs faibles. En effet, l'augmentation de module élastique en passant d'une valeur de 6000 à 7000 MPa donnes une augmentation de déplacement est environ 2 fois plus grande que celle engendrée par la variation de 9000 à 1000 MPa.

## V.11.2. Effet de la variation de coefficient de Poisson:

Pour étudier l'influence de coefficient de Poisson nous proposons d'étudier les valeurs suivantes de ν (0.25 ; 0.3 ; 0.35 ; 0.4).

Les résultats des calculs obtenus sont présentés sur la figure (V.19) et le tableau (V.12) suivants:

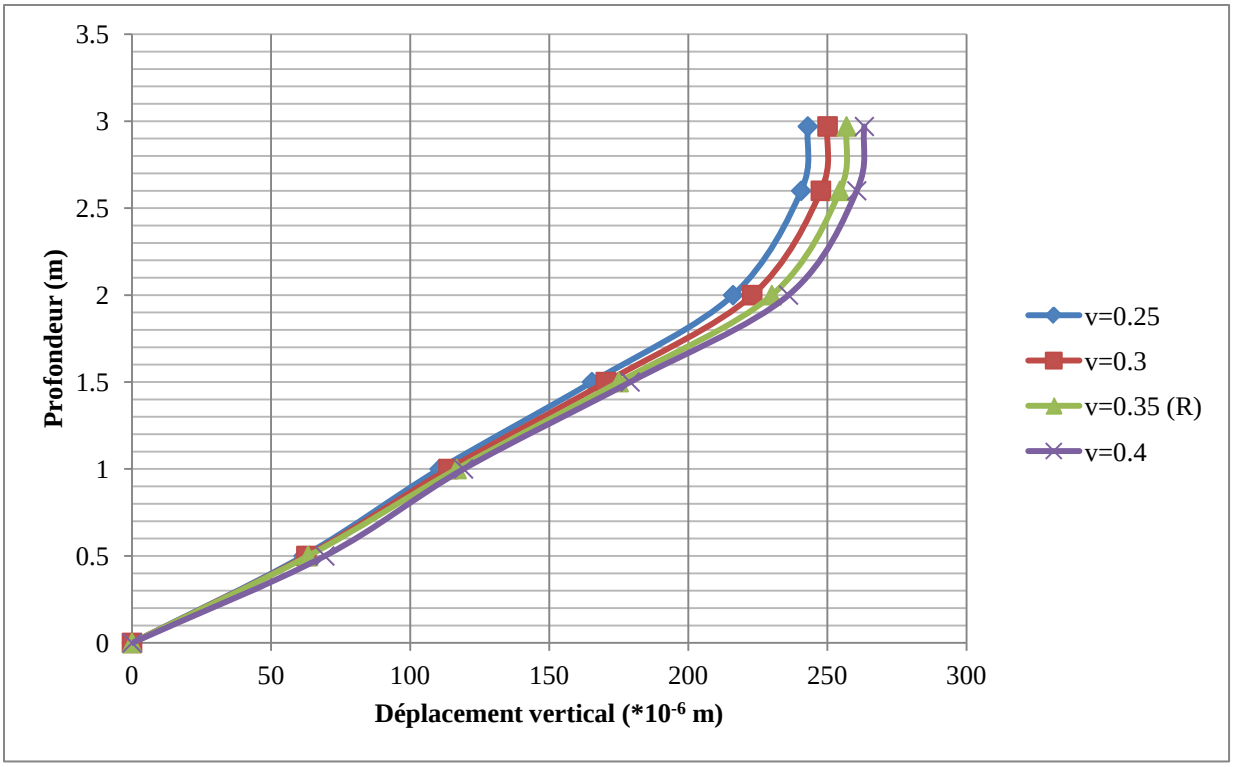



**Figure V.19:** Influence de coefficient de poisson du sol support sur les déplacements verticaux de la chaussée

| Coefficient de Poisson | Déplacements vertical (m) | ΔU/Ur (%) |
|---|---|---|
| 0.25 | $242.96*10^{-6}$ | -5.41 |
| 0.30 | $250.06*10^{-6}$ | -2.65 |
| 0.35 (Valeur de référence) | $256.88*10^{-6}$ | - |
| 0.40 | $263.3*10^{-6}$ | +2.49 |

**Tableau V.12:** Influence de coefficient de poisson du sol support

À partir de ces résultats des différents calculs effectués, on déduit que le coefficient de poisson du sol, comme pour le module d'Young présente une influence significative sur les déplacements verticaux.

### V.11.3. Effet de la variation de la cohésion, l'angle de frottement et de dilatance du sol support:

En ce qui concerne la variation de l'effet de la cohésion, l'angle de frottement et l'angle de dilatance, on a fait varier ces 3 paramètres avec plusieurs valeurs mais les résultats sont restés inchangés.

Ceci nous montre que la variation de la cohésion, l'angle de frottement et l'angle de dilatance n'a aucune influence sur les déplacements verticaux dans notre corps de chaussée.

## V.12. Conclusion:

Cette étude nous a permet de tirer des conclusions intéressantes sur la déformation des chaussées renforcées. L'étude paramétrique qui a été réalisée nous a permis aussi de mettre en évidence l'importance de plusieurs paramètres dans la modélisation numérique et tester leurs influences sur le comportement des déformations des chaussées renforcées.

On note les conclusions suivantes :

- La présence du renforcement a une influence significative sur le comportement d'une chaussée souple dans un système élastique.

- La meilleure position de géotextile qui donne la minimum valeur de déplacement vertical est lorsque le géotextile est intercalé directement entre le sol support et la couche de GNT.

- Lorsque le géotextile est placé aux milieux de la couche de GNT ou sous la première ou la deuxième couche de GB l'effet de renforcement est le même.

- Lorsque on diminué la couche de fondation GNT et la couche de base GB séparément on obtient un déplacement vertical plus grande aux cela de modèle de référence.

- Lorsque la diminution dans la couche de fondation GNT est accompagnée avec une élimination de la deuxième couche de base GB, le comportement (Sol-GNT-GB-BB-géotextile) donne la minimum valeur possible de déplacement vertical, aussi tout si diminution dans les déférentes couches de chaussée est considérée comme un gain économique, notamment à moyen et à long terme.

- En ce qui concerne l'étude paramétrique le module élastique et le coefficient de Poisson présentent une influence significative sur les déplacements verticaux de la chaussée

- La cohésion, l'angle de frottement et l'angle de dilatance n'a aucune influence sur les déplacements verticaux dans notre corps de chaussée.

# CONCLUSION GENERALE

Les procédés de renforcement du corps de chaussée routier se sont considérablement développés à travers le monde dans le domaine de la construction géotechnique grâce à leur performance, à leur économie et à leur esthétique.

L'objectif du présent mémoire était de développer la compréhension du comportement des ouvrages des chaussées routière renforcé par des renforcements géosynthétiques, notamment en termes de déformation verticale.

L'effet du renforcement du corps de chaussée routier sur sol de faible portance par géotextiles ou géogrilles est un phénomène complexe limitant l'utilisation des calculs analytiques. La modélisation numérique de cet effet nécessite des outils professionnels (tels que PLAXIS, ABACUS, FLAC,...) faisant intervenir des éléments de renforcements, des éléments d'interface et des modèles de comportement élasto-plastique avec des calculs en élément finis et déférence finis.

L'analyse des résultats de simulation de la présente recherche à l'aide de logiciel Plaxis2d permet de dégager les conclusions suivantes :

- Les résultats des simulations montrent que l'amélioration de la portance par le renforcement présente une influence significative sur le comportement de chaussée.

- La meilleure position de géotextile qui donne la minimum valeur de déplacement vertical est lorsque le géotextile est interposé entre le sol support et la couche de fondation.

- Lorsque il y a une diminution dans la couche de fondation et la couche de base séparément on obtient un déplacement vertical plus grande aux cela de modèle de référence.

- Lorsque la diminution dans la couche de fondation est accompagnée avec une élimination de la deuxième couche de base, le comportement (Sol-GNT-GB-BB-géotextile) donne la minimum valeur possible de déplacement vertical.

- L'étude paramétrique sur l'influence des paramètres du sol sur les déplacements verticaux du corps de chaussée à montré que le module élastique et le coefficient de Poisson présentent une influence significative sur les déplacements verticaux de la chaussée, mais aux contraire la cohésion, l'angle de frottement et l'angle de dilatance n'a aucune influence sur les déplacements verticaux dans notre corps de chaussée.

Donc à la fin de ce travail on peut dire que le renforcement des chaussées routières par des géosynthétiques présente plusieurs avantage tel que :

- Economiser les ressources ;
- Augmenter la performance ;
- Réduire l'épaisseur de déférente couche ;
- Allonger la durée de vie ;
- Réduire les coûtes ;
- Réduire les durées de réalisation.

# REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE


[1] JEUFFROY M., “Conception et Construction des chaussées tome 1 les véhicules, les sols, le calcul des structures ”. Editions Eyrolles 1978.

[2] B60 et B61 “Catalogue des structures, types des chaussées neuves 1978”.

[3] B40 et B41 “Normes techniques d’aménagement des routes et de trafic et capacité des routes 1972”.

[4] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, Guide for design of pavement structures, Washington, D.C, 1993.

[5] SETRA/LCPC “Conception et Dimensionnement des structures de chaussée”, Guide technique, FRANCE 12/1994.

[6] CTTP / MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS “Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves ”, Algérie 11/2000.

[7] [LCPC, 1998] LCPC. Méthode d’essai n°52. Catalogue des dégradations de surface des chaussées. 1998.

[8] LE MONITEUR DES TRAVAUX PUBLICS ET DU BÂTIMENT. “Définition, mise en œuvre et dimensionnement des géosynthétiques”, Cahier élaboré par le Comité français des géosynthétiques (CFG), N°5811. Disponible sur : http://www.lemoniteur.fr/ (consulté le 10.04.2015).

[9] Lambert S. (2000), Les géotextiles : fonctions, caractéristiques et dimensionnement, Ingénieries – EAT, N°22, 2000, p 17 - 26.

[10] Geosynthetic Materials Association. Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures. GMA White Paper II, prepared for AASHTO Committee 4E, 176 p, 2000.

[11] Palmeira E.M. Geosynthetiques dans l’ingenierie des routes, IGS.

[12] R.B.J. Brinkgreve, Delft University of Technology & PLAXIS bv, Pays-Bas, ‘Plaxis, manuel de référence, version 8’.

[13] Talhaoui Zakia and Allal Mohamed Amine: “Contribution to Mechanical Behavior Study Corps Roadways Reinforced Geosynthetics” Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2016 (21.12), pp 4101-4119. Available at ejge.com.

[14] Notions générales sur les géotextiles en géotechnique routière, note d'information technique, Février 1983, Réimpression Juin 1993, France.

[15] Erickson, H., and Drescher, A. "The use of geosynthetics to reinforce low volume roads", Final report, university of Minnesota, 2001.

[16] Présentation AFITEX Algérie, les geosynthetiques fonctions et domaines d'application, par Messaoud ZERMANI & Said TABTI, médéa le 05 mai 2010.

[17] Giroud, J. P. (1989). "Geotextile Engineering Workshop-Design Examples". Report FHWAHI- 89-002, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

[18] D.R. Snethen, F.C. Townsend, L.D.Johnson, D. M. Patrick, P. J. Vedros. "Review of Engineering Experiences with Expansive soils in Highway Subgrades". US Army Engineer Water Ways Experiment Station, FHWA, **009751**, USA (1975).

[19] V. Dakshanamanthy, V. Raman. A simple method of identifying an expansive soil. Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering **13** (1), 97–104 (1973).

[20] Gourc, J. P., Perrier, H., and Riondy, G., ''Unsurfaced Roads on Soft Subgrade : Mechanism of Geotextile Reinforcement.'' Proceedings of the Eighth European Conference on Soil, Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Finland, vol. 2., pp. 495–498,1983.

[21] Holtz R.D., Geosynthetics for soil reinforcement 9th Spencer J. Buchanan Lecture, University of Washington Department of Civil & Environmental Engineering, November 2001.

[22] Houlsby, G. T., and Jewell, R. A. "Design of Reinforced Unpaved Roads for Small Rut Depths," Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes, and Related Products, Balkema, Vol. 1, The Hague, Netherlands, pp. 171-176, 1990.

[23] JEUFFROY M., "Conception et Construction des chaussées tome 1 les véhicules, les sols, le calcul des structures ". Editions Eyrolles 1978.

[24] Maxwell, S., Kim, W., Edil, T.B. and Benson, C. H., "Effectiveness of geosynthetics in stabilizing soft subgrades", final report university of Wisconsin-Madison, 2005.

[25] Perkins, S.W. and Ismeik, M., "A Synthesis and Evaluation of Geosynthetic-Reinforced Base Layers in flexible Pavements: Part I," Geosynthetics International, Vol. 4, No. 6,pp. 549-605, 1997.

[26] Perkins, S.W. and Ismeik, M., “A Synthesis and Evaluation of Geosynthetic-Reinforced Base Layers in flexible Pavements: Part II,” Geosynthetics International, Vol. 4, No. 6,pp. 605-621, 1997.

[27] Perkins, S. W., ‘‘Geosynthetic reinforcement of flexible pavements:Laboratory based pavement test sections.’’ Final Rep., FHWA/MT-99-001/8138, 140 pp, 1999.

[28] The Tensar Corporation. A Review of Geosynthetic Functions and Applications in Paved and Unpaved Roads. Tensar Technical Note (TTN:BR11), 45 p, 1998.

[29] The Tensar Corporation. A Review of Geosynthetic Functions and Applications in Paved and Unpaved Roads. Tensar Technical Note (TTN:BR11), 45 p, 1998.

[30] Wathugala, G.W., Huang, B., and Pal, S., “Numerical Simulation of Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements,” Transportation Research Record, No. 1534, pp. 58-65, 1996.

[31] MEMOIRE DE MAGISTER, MODELISATION NUMERIQUE DU RENFORCEMENT DU CORPS DE CHAUSSEE PAR GEOGRILLE. Présenté par: REMADNA Mohamed Saddek.

[32] Etude d'exécution dédoublement de la RN01 entre Berrouaghia et Boughzoul pk 109+000 - pk 177+500. Lot nº1. Seghouane - Moudjebeur sur 16,2 km. Rapport géologique et géotechnique. Section 1. Seghouane - Moudjebeur

[33] MEMOIRE DE MAGISTÈRE: ETUDE DU PHENOMENE DE L’ORNIERAGE DES CHAUSSEES BITUMINEUSES: Cas d’une Route Nationale dans la wi1aya de Tizi-Ouzou. Présenté par: CHEBREK Dehbia.

[34] projet de fin d’étude Pour l’obtention du diplôme d’ingénieur d’état en travaux publics, ETUDE EN APD DU DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE NATIONALE 43 ENTRE SIDI ABD LAAZIZ ET BENI MAAZOUZ SUR 7,6 KM. Présenté par: BOUABDALLAH Messaoud.

[35] International Geosynthetics Society (IGS): http://www.geosyntheticssociety.org/

[36] Projet de fin d’étude en vue de l’obtention d’un diplôme de MASTER en génie géotechnique. Etude de renforcement de corps de chaussée par géogrille. Réalisé par : Mr. BOUDOUANI Rafik et Mme .OTMANI HASNAOUI Hadjer.

[37] Thèse Pour l’Obtention du Diplôme de Docteur EN-SCIENCES, Spécialité : Génie-Civil. Thème COMPORTEMENT MECANIQUE DES SOLS FINS, Application a la valorisation des sédiments de barrages en technique routière. Presentée par BOURABAH Maghnia Asmahane