



République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université Ain-Temouchent Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil et travaux publics

Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : TRAVAUX PUBLICS  
Spécialité : VOIES ET OUVRAGES D'ART

## **Renforcement des chaussées par des matériaux composites : Cas d'études projet PN30 Mascara**

Thème :

**Présenté Par :**

- ❖ **Benchick Ahmed Iyad**
- ❖ **Kenoui Mohamed**

Devant le jury composé de :

- |                           |                                       |
|---------------------------|---------------------------------------|
| ❖ <b>Mdm BELABACI</b>     | <b>Pr Président U, AinTemouchent</b>  |
| ❖ <b>Mr CHALABI</b>       | <b>Dr Examineur U, Ain Temouchent</b> |
| ❖ <b>Mr MOUAICI Fethi</b> | <b>Dr Encadrant U, AinTemouchent</b>  |

**Année universitaire : 2024-2025**

## Remerciements

Avant tout, nous adressons nos remerciements à **ALLAH**, le Tout Puissant pour la volonté, la santé et la patience que nous a donnée durant toutes ces années d'études et pour la réalisation de ce travail que nous espérons être utiles.

Nous exprimons nos profondes et sincères gratitudee à **Mr Mouaici Fathi**, qui a accepté de nous encadrer, sa gentillesse, son sérieux et son sens des responsabilités nous a été un encouragement précieux. Il n'a jamais hésité, malgré ces nombreux engagements, à l'avoir à notre disposition, depuis le tout début de nos travaux.

Nous tenons également à remercier infiniment les membres de jury, le président Mme Belabacine et nos examinateurs Mr Chalabi, veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance.

Enfin, un remerciement éternel à nos parents, nos frères, ainsi qu'à toute nos familles et tous nos amis et nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin.

## **Dédicace :**

### **Je dédie ce modeste travail :**

#### **A mes chers parents**

Dont leurs mérites leurs sacrifices, leurs qualités humaines m'ont permis de vivre ce jour. Les mots me manquent pour exprimer toute la reconnaissance, la fierté et le profond amour que nous vous portons pour les sacrifices qu'ils ont consenti pour ma réussite, qu'ils trouvent ici le témoignage de mon attachement ma reconnaissance, gratitude et respect, que dieu leur

préservent bonne santé et longue vie. Tous mes sentiments de reconnaissance pour vous. Je demande à dieu le tout puissant de vous accorder la santé, le bonheur et une longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

#### **A mon frère & ma sœur**

Que ce travail soit l'expression de ma profonde affection. Je vous remercie pour le soutien moral et l'encouragement que vous m'avez accordé. Je vous souhaite tout le bonheur que vous méritez.

#### **A tous mes chères**

Que je ne pourrais nommer de peur d'en oublier notre attachement et mes affections les plus

Sincères. A mes ami(e)s A tous ceux qui ont su m'apporter aide et soutien aux moments propices.

Les personnes que j'ai passé de bons moments et particulièrement et qui sont toujours là pour moi et que je souhaite tout le bonheur du monde Ainsi que tous mes enseignants durant tous

Mon cursus. Et a toutes les personnes que j'aime et ceux qui m'aiment

**Ahmed Iyad**

## **Dédicace :**

### **Je dédie ce modeste travail :**

#### **À ma famille,**

Merci pour votre amour inconditionnel, votre soutien sans faille et vos sacrifices qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici. Vous êtes ma source de force et de motivation.

#### **À mes enseignants et encadreurs,**

Merci pour votre transmission du savoir, vos précieux conseils et votre patience tout au long de mon parcours académique. Vous avez forgé mon esprit critique et guidé mes pas vers l'excellence.

#### **À mes collègues et amis,**

Merci pour l'entraide, les moments partagés et les encouragements durant ces années d'études. Vous avez rendu ce parcours enrichissant et mémorable.

#### **À Monsieur ChekrouneRedha, PDG de LTPO,**

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour votre leadership visionnaire et les opportunités que vous offrez aux jeunes diplômés. Votre engagement envers l'innovation et le développement m'inspire.

#### **À Monsieur Khiloun Nair,**

Merci pour votre accompagnement professionnel, vos conseils avisés et votre disponibilité. Votre expertise a été d'une grande valeur pour la réalisation de ce travail.

Ce mémoire est le fruit de vos contributions directes ou indirectes. Qu'il soit l'expression de ma reconnaissance envers vous tous.

**Mohamed**

# Résumé

Le réseau routier algérien, essentiel au développement socio-économique, subit une dégradation accélérée due au trafic lourd, aux conditions climatiques et au vieillissement des matériaux. Ces altérations compromettent la durabilité des chaussées, augmentant les coûts d'entretien et réduisant leur efficacité. Pour y remédier, les matériaux composites émergent comme une solution innovante, offrant résistance, légèreté et durabilité supérieures. Ce rapport analyse leur application dans le renforcement des chaussées, en étudiant leurs propriétés, les techniques de modélisation (via ANSYS) et un cas pratique (projet PN30 Mascara). Les géogrilles, notamment, optimisent la répartition des contraintes et réduisent les fissures. L'étude souligne l'importance d'une approche multidisciplinaire (géotechnique, mécanique des matériaux) et valide l'efficacité des renforts synthétiques par simulation numérique. Enfin, elle met en lumière les avancées technologiques et les perspectives de recherche pour des infrastructures plus résilientes.

# Abstract

The Algerian Road network, vital for socio-economic development, is experiencing accelerated degradation due to heavy traffic, harsh climatic conditions, and aging of material. These deteriorations compromise pavement durability of the roadways, increasing maintenance costs and reducing their efficiency. To remedy this, composite materials are emerging as an innovative solution, offering superior strength, lightness, and durability. This report analyzes their application in pavement reinforcement by examining their properties, modeling techniques (via ANSYS), and a practical case study (PN30 Mascara project). Geogrids, in particular, optimize stress distribution and reduce cracking. The study highlights the importance of a multidisciplinary approach (geotechnics, material mechanics) and validates the effectiveness of synthetic reinforcements through numerical simulation. Finally, it showcases technological advancements and research prospects for more resilient infrastructure.

## ملخص

تعدّ الشبكة الطرقيّة الجزائريّة، حيوية للتنمية الاجتماعيّة والاقتصاديّة، عرضة لتدهور متسارع بسبب الحركة المروريّة الكثيفة والظروف المناخيّة وتآكل المواد مع الزمن. هذه التلّفات تُهدّد متانة الرصف، مما يزيد تكاليف الصيانة ويُقلّل من كفاءته. لمعالجة هذه المشكّلة، تبرز المواد المركّبة كح لمبتكر، حيث توفر مقاومة أعلى وخفة وزن ومتانة فائقة. يحلّل هذا التقرير تطبيقها في تعزيز الرصف، من خلال دراسة خصائصها وتقنيّات النمذجة عبر برنامج (ANSYS) (وحالة عمليّة) مشروع PN30 معسّكر. (وتُحسّن الشبكات الجيوتقنيّة -خاصةً- توزيع الضغوطات قلّل من التشقّقات. تؤكد الدراسة على أهميّة اتباع نهج متعدد التخصصات (الجيوتقنيّة، ميكانيكا المواد) وتُثبت فعالية التدعيمات الصناعيّة عبر المحاكاة الرقمية. أخيراً، تُسلّط الضوء على التطورات التكنولوجيّة وأفاق البحث من أجل بنيّ تحتية أكثر مرونة .

# Table des matières

<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>12</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>13</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>17</b>
INTRODUCTION GENERALE.....	18
<b>CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>20</b>
1. INTRODUCTION .....	21
1.1 FONDAMENTAUX DES CHAUSSEES ROUTIERES .....	21
1.2 STRUCT-URE ET ROLE DES COUCHES DE CHAUSSEE .....	21
.....	24
1.3 MATERIAUX CONSTITUTIFS DES CHAUSSEES SOUPLES .....	24
ENROBES BITUMINEUX : .....	25
1.4 <b>PRODUITS D'ACCROCHAGE ENTRE COUCHES BITUMINEUSES</b> : .....	26
1.5 SOLLICITATIONS ET COMPORTEMENT MECANIQUE DES MATERIAUX ROUTIERS.....	28
1.6 COMPORTEMENT MECANIQUE DES MATERIAUX ROUTIERS :.....	32
1.6.1 MATERIAUX NON LIES : .....	32
1.6.2 MELANGES BITUMINEUX : .....	33
1.6.3 VISCOELASTICITE LINEAIRE :.....	34
1.6.4 FATIGUE : .....	34
1.6.5 INTERFACES ENTRE COUCHES DE CHAUSSEE : .....	36
1.7 <b>METHODES DE CALCUL DES CHAUSSEES</b> : .....	37
1.7.1 METHODES ELASTOSTATIQUES (BOUSSINESQ ET BURMISTER) : .....	37
1.7.2 METHODE DES ÉLÉMENTS FINIS (MEF) :.....	39
1.7.3 METHODE DES ÉLÉMENTS SPECTRAUX (MES) :.....	39
1.8 DIMENSIONNEMENT RATIONNEL (METHODES FRANÇAISES) : .....	39
1.8.1 PANORAMA DES METHODES DE RENFORCEMENT TRADITIONNELLES... 40	
1.8.2 LE CHEMISAGE :.....	41
1.8.3 CHEMISAGE EN ACIER :.....	41
1.8.4 CHEMISAGE EN BETON : .....	41
1.8.5 LE RENFORCEMENT AVEC PLAQUES EN ACIER :.....	41
1.8.6 LE RENFORCEMENT PAR PRECONTRAINTE EXTERNE :.....	42
<b>CHAPITRE 2 : MAJEURES DEGRADATIONS CONSTATEES DANS LE DOMAINE DES ROUTES</b> .....	<b>44</b>
2.1 INTRODUCTION .....	45

2.2 MAJEURES DEGRADATIONS CONSTATEES DANS LE DOMAINE DES ROUTES	45
2.3 CAUSES DES DESORDRES	45
2.3.1 CAUSES LIEES AU TRAFIC :	46
2.3.2 CAUSES LIEES AU CLIMAT :	47
2.3.3 GEL ET DEGEL :	47
2.3.3 PRECIPITATIONS (PLUIE, NEIGE, GRELE) :	48
2.3.4 CAUSES LIEES AUX MATERIAUX :	48
2.4 CAUSES D'ORIGINE MECANIQUE (AU-DELA DU TRAFIC) :	49
2.4 .1 SEISME :	49
2.4.2 CHOC :	49
2.4.3 INCENDIE :	49
2.5 CAUSES D'ORIGINE CHIMIQUE :	50
2.5.1 CARBONATATION :	50
2.5.2 ALCALI-REACTION :	50
2.5.3 ATTAQUES DES SULFATES :	50
2.5.4 REACTIONS DES CHLORURES :	50
2.5.5 CORROSION	50
2.6 CAUSES D'ORIGINE PHYSIQUE :	51
2.7 ERREURS DE CONCEPTION, CALCULS, EXECUTION :	51
2.7.1 ERREURS DE CONCEPTION :	51
2.7.2 ERREURS DE CALCULS :	51
2.7.3 ERREURS D'EXECUTION :	51
2.8 TYPOLOGIE DETAILLEE DES DEGRADATIONS	52
2.8.1 FISSURATIONS :	52
2.8.2 DEFORMATIONS :	55
2.8.3 ARRACHEMENTS (DESINTEGRATION DE SURFACE) :	56
2.7.3 DEGRADATIONS SPECIFIQUES EN MILIEU URBAIN :	60
2.9 METHODES D'AUSCULTATION ET DE DIAGNOSTIC DES CHAUSSEES	63
2.10 PROGRAMMES DE MODELISATION (EX: ELMOD6, ALIZE III) :	65
2.11 CONCLUSION	66
<b>CHAPITRE 3 : INTRODUCTION AUX MATERIAUX COMPOSITES</b>	<b>67</b>
3.1 INTRODUCTION	68
3.2 DEFINITION ET COMPOSANTS ESSENTIELS DES MATERIAUX COMPOSITES	68
3.3 CLASSIFICATION ET CARACTERISTIQUES DES MATRICES ET DES RENFORTS (FIBRES)	69
3.3.1 CLASSIFICATION PAR FORME DES CONSTITUANTS :	69

3.3.2 CLASSIFICATION PAR NATURE DES CONSTITUANTS :	70
3.3.4 MATRICES :	70
3.3.5 FORMES DE RENFORTS :	72
3.4 PROPRIETES MECANQUES, THERMIQUES ET HYGROSCOPIQUES DES COMPOSITES.....	74
3.4.1 PROPRIETES MECANQUES :	74
3.4.2 PROPRIETES THERMIQUES :	74
3.4.3 PROPRIETES HYGROSCOPIQUES :	74
3.5 AVANTAGES ET LIMITES DES COMPOSITES DANS LE GENIE CIVIL .....	75
3.5.1 AVANTAGES :	75
3.5.2 INCONVENIENTS :	76
3.6 PROCEDES DE MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES POUR LES CHAUSSEES .....	77
3.6.1 NOTION DE MULTICOUCHES COMPOSITES POUR LA REPARATION DES OUVRAGES :	78
3.6.2 DIFFERENTES TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE :	78
3.7 CONCLUSION.....	80
<b>CHAPITRE 4 : TECHNIQUE DE RENFORCEMENT DES ROUTES PAR LES MATERIAUX COMPOSITES .....</b>	<b>81</b>
4.1 INTRODUCTION .....	82
4.2 PROCEDES DE MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES POUR LES CHAUSSEES .....	82
4.2.1 NOTION DE MULTICOUCHES COMPOSITES POUR LA REPARATION DES OUVRAGES :	82
4.3 DIFFERENTES TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE :	83
4.3.1 MOULAGE AU SAC :	83
4.3.2 STRATIFICATION DIRECTE (OU MOULAGE AU CONTACT) :	83
4.3.3 COLLAGE DE PLAQUES COMPOSITES :	84
4.3.4 ENROULEMENT FILAMENTAIRE :	84
4.3.5 PRODUITS PULTRUDES :	84
4.4 GEOGRILLES POUR LE RENFORCEMENT DES CHAUSSEES :	84
4.4.1 APPLICATIONS :	85
4.4.2 INSTALLATION :	86
4.4.3 BENEFICES :	86
4.5 MODELISATION DU COMPORTEMENT DES STRUCTURES RENFORCEES : CONTRAINTES D'INTERFACE .....	86
4.5.1 CONTRAINTES D'INTERFACE DE CISAILLEMENT ( $\tau(x)$ ) :	87
4.5.2 CONTRAINTES D'INTERFACE NORMALES ( $\sigma(x)$ ) :	87
4.5.3 ANALYSE DES CONTRAINTES POUR DIFFERENTS CAS DE CHARGES :....	88

<b>CHAPITRE 05 : CAS D'ETUDES PROJET PN30 MASCARA.....</b>	<b>89</b>
5.1 INTRODUCTION : .....	90
5.2 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS : .....	90
5.2.1 <i>Principes de La méthode des éléments finis</i> :.....	91
5.2.2 <i>Etapas de calcul par la méthode des éléments finis</i> :.....	91
5.4. LOGICIEL DE CALCUL ANSYS :.....	92
5.3 CAS D'ETUDES :.....	93
5.4 PROPRIETES MECANQUES DES MATERIAUX : .....	94
5.5 MODELE GEOMETRIQUE :.....	95
5.6 ETUDES DE L'INFLUENCE DE LA PRESSION DE CONTACT : .....	96
5.7 LES RESULTATS OBTENUS :.....	97
5.7.1 <i>Chaussée non renforcée</i> : .....	97
5.7.2 <i>Chaussée renforcée (Position N01)</i> : .....	98
5.7.3 <i>Chaussée renforcée (Position N02)</i> : .....	99
5.7 DEFORMATION TOTAL (CHAUSSEE NON RENFONCEE): .....	100
5.8 DEFORMATION DIRECTIONNEL : .....	100
5.9 LES CONTRAINTES NORMALES : .....	101
5.10 LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT : .....	102
5.8 CONCLUSION :.....	114
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>116</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>118</b>

# Liste des tableaux

<i>Tableau I: Couches de la Structure d'une Chaussée Souple - Rôles et Matériaux Typiques.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau II: Comparaison des Familles de Structures de Chaussée .</i>	<i>26</i>
<i>Tableau III: Résumé des Types et Causes des Dégradations des Chaussées .....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau IV: Classification et Propriétés Clés des Constituants des Composites .....</i>	<i>73</i>
<i>Tableau V: Propriétés Mécaniques Typiques des Composites Couramment Utilisés en Génie Civil.....</i>	<i>75</i>
<i>Tableau 6 : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés ....</i>	<i>94</i>
<i>Tableau 7 : résultats obtenus.....</i>	<i>96</i>
<i>Tableau 8 : Résultats numériques obtenir par modélisation en élément finis d'une chaussée souple avec trois cas de simulation .</i>	<i>114</i>

## Liste des figures

Figure 1 : Structure d'une chaussée souple .....	24
Figure 2: Exemples de courbes granulométriques continue (en bleu) et discontinue (en rouge) .....	24
Figure 3: Schématisation des sollicitations induites par la température (Di Benedetto & Corté, 2004) .....	29
Figure 4: Schématisation des sollicitations induites par le trafic (Di Benedetto & Corté, 2004) .....	29
Figure 5: Etat de déformation d'une chaussée sous le chargement d'une roue jumelée standard de 65 kN.....	30
Figure 6: Etat de contrainte d'une chaussée sous le chargement d'une roue jumelée standard de 65 kN.....	30
Figure 7: Directions des contraintes principales au passage d'une charge roulante (reproduit de Doré (2009)).....	31
Figure 8: Déformations selon les directions (a) transversale et (b) longitudinale au passage d'un boggie à trois essieux (LCPC-Airbus-STBA, 2001) .....	32
Figure 9: Définition du module de cisaillement $G$ et du ratio d'amortissement $D$ sous sollicitation .....	32
Figure 10: Evolutions normalisées du module de cisaillement et de l'amortissement d'argiles en fonction de l'amplitude de déformation (Dobry & Vucetic, 1987 ; Vucetic & Dobry, 1991) (0.01 % correspond à 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	32
Figure 11: Domaines de comportement des matériaux bitumineux (Di Benedetto & Corté, 2004).....	34
Figure 12: Expériences fondamentales sur matériau viscoélastique : (a) effacement ; (b) fluage ; (c) relaxation .....	34
Figure 13: Signaux de contrainte et de déformations axiale et radiale mesurés lors d'un essai de module complexe sur éprouvette cylindrique à 20.8°C et 0.3 Hz.....	35
Figure 14: Essai de module complexe et modélisation 2S2P1D : ....	36
Figure 15: Essais de fatigue à 10°C et 10 Hz : (a) Evolution de la norme et de l'angle de phase du module complexe au cours d'un essai de fatigue sur enrobé bitumineux (Tapsoba, Sauzéat, & Di Benedetto, 2013) ; (b) Courbes de Wöhler déduites en utilisant six crit .....	37
Figure 16: Géométrie du massif de Boussinesq .....	38

Figure 17: Applications de la méthode de Boussinesq : (a) contrainte verticale ; (b) déflexion.....	38
Figure 18: Massif multicouche utilisé pour le calcul selon la méthode de Burmister.....	38
Figure 19: Composantes harmoniques d'une charge FWD (Sebaaly, Mamlouk, & Davis, 1986).....	42
Figure 20: les majeures dégradations des routes .....	46
Figure 21: sur sollicitation des routes .....	47
Figure 22: effet du gel et dégel sur la toute.....	47
Figure 23: l'effet des précipitations sur la route.....	48
Figure 24: arrachements de chaussée .....	49
Figure 25: Fissures transversales .....	52
Figure 26: Fissures longitudinales.....	53
Figure 27: Fissures en dalle .....	53
Figure 28: Fissures de joint .....	53
Figure 29: Fissures d'adaptation .....	54
Figure 30: Faiençage.....	55
Figure 31: Ornières à petit rayon.....	55
Figure 32: Ornières à grand rayon .....	56
Figure 33: Affaissement de rive .....	56
Figure 34: Désenrobage .....	57
Figure 35: Pelade.....	57
Figure 36: Nid de poule .....	58
Figure 37: Plumage.....	58
Figure 38: Remontées de boue .....	59
Figure 39: Remontées d'eau .....	59
Figure 40: Ressuage.....	60
Figure 41: Dénivellation des regards et puisards.....	60
Figure 42: Auscultation visuelle .....	63
Figure 43: Appareil de Mesure de déflexion (F/HWD) .....	64
Figure 44: Composants Essentiels des Matériaux Composites.....	69
Figure 45: Moulage par projection simultanée .....	83
Figure 46: schéma Moulage par projection simultanée .....	85
Figure 47 : Organigramme d'un programme de calcul par MEF.....	92
Figure 48 : Emplacement de la nappe gorille.....	93
Figure 49 : Géométrie du modèle utilisé sans renforcement .....	95
Figure 50 : Géométrie du modèle utilisé avec renforcement ( position N01) .....	95
Figure 51 : Géométrie du modèle utilisé avec renforcement ( position N02) .....	95

<i>Figure 52 : Déformation Total d'une chaussée non renforcée</i> .....	100
<i>Figure 53 : Déformation Directionnelle d'une chaussée non renforcée (Axe X)</i> .....	100
<i>Figure 54 : Déformation Directionnelle d'une chaussée non renforcée (Axe Y)</i> .....	101
<i>Figure 55 : Déformation Directionnelle d'une chaussée non renforcée (Axe Z)</i> .....	101
<i>Figure 56 : Les contraintes normales d'une chaussée non renforcée (Axe X)</i> .....	101
<i>Figure 57 : Les contraintes normales d'une chaussée non renforcée (Axe Y)</i> .....	102
<i>Figure 58 : Les contraintes normales d'une chaussée non renforcée (Axe Z)</i> .....	102
<i>Figure 59 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée non renforcée (Plan XY)</i> .....	102
<i>Figure 60 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée non renforcée (Plan XZ)</i> .....	103
<i>Figure 61 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée non renforcée (Plan YZ)</i> .....	103
<i>Figure 62 : Déformation Total d'une chaussée renforcée Position N01</i> .....	103
<i>Figure 63 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe X)</i> .....	104
<i>Figure 64 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe Y)</i> .....	104
<i>Figure 65 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe Z)</i> .....	104
<i>Figure 66 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe X)</i> .....	105
<i>Figure 67 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe Y)</i> .....	105
<i>Figure 68 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe Z)</i> .....	105
<i>Figure 69 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N01 (PlanXY)</i> .....	106
<i>Figure 70 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N01 (Plan XZ)</i> .....	106
<i>Figure 71 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N01 (Plan YZ)</i> .....	106

<i>Figure 72 : Déformation Total d'une chaussée renforcée Position N02.....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 73 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe X).....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 74 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe Y).....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 75 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe Z).....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 76 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe X).....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 77 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe Y).....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 78 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe Z).....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 79 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N02 (Plan XY) .....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 80 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N02 (Plan XZ) .....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 81 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N02 (Plan YZ) .....</i>	<i>110</i>

## Introduction générale

## Introduction générale

Le réseau routier constitue un pilier essentiel du développement économique et social d'un pays, en assurant la connectivité entre les villes et les agglomérations, et en stimulant les échanges commerciaux. En Algérie, ce réseau, géré par le sous-secteur des Travaux Publics, représente un moteur fondamental de la croissance nationale, bénéficiant d'investissements massifs dans le Bâtiment et les Travaux Publics (B.T.P.) et contribuant significativement au Produit Intérieur Brut (PIB) . Le réseau routier algérien est d'ailleurs l'un des plus importants du Maghreb et d'Afrique, s'étendant sur plus de 108 302 km.

Malgré leur rôle crucial, les chaussées sont des infrastructures dynamiques, constamment soumises à des sollicitations intenses qui entraînent leur dégradation progressive. Les principales causes de cette détérioration incluent l'effet du trafic lourd, les conditions climatiques rigoureuses (variations de température, précipitations, cycles de gel-dégel, rayonnement UV), et le vieillissement intrinsèque des matériaux. La vitesse et la nature de ces désordres dépendent également des caractéristiques des matériaux utilisés, de leur épaisseur, ainsi que des conditions de fabrication et de mise en œuvre. Des problèmes liés à l'instabilité du sol support (remblais ou terrain naturel) peuvent également survenir indépendamment du trafic ou du climat. Ces dégradations se manifestent par divers désordres visibles en surface, affectant la sécurité des usagers, le confort de roulement et l'efficacité économique du réseau. L'insuffisance de l'entretien et les surcharges des poids lourds menacent la durabilité des routes, augmentant les coûts d'exploitation des véhicules et réduisant la rentabilité du réseau routier.

Face à ces défis, le maintien d'un patrimoine routier en bon état est impératif en raison de ses impacts socio-économiques étendus. Cela exige un entretien planifié, régulier, contrôlé et bien géré pour réparer les dégradations dès leur apparition, permettant ainsi d'éviter des coûts élevés de réhabilitation ou de reconstruction à long terme. Dans ce contexte, les matériaux composites

émergent comme une solution innovante et durable pour la réparation et le renforcement des chaussées. Leurs propriétés avantageuses, telles que leur légèreté, leur résistance mécanique élevée, leur durabilité et leur bonne tenue face à la corrosion, les distinguent des matériaux traditionnels. Ils offrent des atouts significatifs, notamment une rigidité accrue, une résistance chimique supérieure, une maintenance réduite et une grande liberté de formes.

Le présent rapport vise à fournir une analyse exhaustive du renforcement des chaussées par des matériaux composites. Il débutera par une exploration des fondamentaux des chaussées routières, incluant leur structure, leurs matériaux constitutifs et les sollicitations qu'elles subissent. Ensuite, il détaillera les pathologies et mécanismes de dégradation observés. Les principes et propriétés des matériaux composites seront ensuite exposés, suivis d'un examen des techniques de renforcement, y compris la modélisation des contraintes d'interface. Une section sera dédiée au projet PN30 Mascara en Algérie, en tant que cas d'étude, pour évaluer la pertinence et le potentiel d'application des composites dans ce contexte. Enfin, le rapport abordera les normes, directives et recherches actuelles, soulignant les avancées récentes et les besoins futurs en recherche dans ce domaine en constante évolution.

# CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

### 1.Introduction

Ce chapitre présente un aperçu des connaissances actuelles sur les propriétés structurelles des chaussées routières et aéroportuaires, établissant une base pour les travaux ultérieurs. Il est structuré en deux parties principales : la mécanique des chaussées, qui analyse les propriétés des chaussées à différentes échelles, des matériaux individuels à la structure globale, et l'auscultation structurelle, [1]. Qui se focalise sur les méthodes d'évaluation de l'état des chaussées à partir de mesures de surface, en particulier l'essai au Falling/Heavy Weight Deflectometer (F/HWD). Cet essai, largement utilisé, mesure les déflexions sous un chargement dynamique, fournissant des données essentielles sur la capacité portante. Les études se concentrent sur les chaussées souples (ou chaussées bitumineuses), qui représentent une part importante des infrastructures routières et aéroportuaires. [2].

#### 1.1 Fondamentaux des Chaussées Routières

Les chaussées routières sont des structures complexes, conçues pour supporter et distribuer les charges du trafic tout en protégeant le sol support sous-jacent. Leur performance et leur longévité dépendent étroitement de la conception de leurs différentes couches, des matériaux qui les composent et de leur comportement face aux sollicitations. [3].

#### 1.2 Structure et Rôle des Couches de Chaussée

Une chaussée est typiquement une structure multicouche, où chaque couche possède des propriétés mécaniques distinctes et un rôle spécifique dans la répartition des charges. La qualité mécanique des couches diminue généralement avec la profondeur, assurant une transmission progressive des efforts vers le sol support. [4].

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

- ❖ **Le sol support** :Il s'agit du terrain naturel sur lequel repose l'ensemble de la chaussée. Sa partie supérieure (PST) peut nécessiter des traitements spécifiques, tels que le drainage ou la purge, si sa capacité portante est jugée insuffisante (inférieure à 20 MPa).
- ❖ **La couche de forme** :Cette couche intermédiaire permet la circulation des engins de chantier à court terme et contribue à améliorer la portance du sol support, le drainage et la protection contre le gel à long terme. Sa portance peut varier de PF2 (environ 50 MPa) à PF4 (environ 200 MPa).
- ❖ **Les couches de base et de fondation** :Elles constituent l'assise principale de la chaussée. Leur fonction est de répartir efficacement les charges verticales provenant de la surface et de protéger les couches inférieures contre les infiltrations d'eau et les effets du gel.
- ❖ **La couche de surface** :C'est la partie la plus exposée de la chaussée, assurant la sécurité, le confort de roulement, l'imperméabilité et la résistance mécanique. Elle est subdivisée en deux sous-couches :
- ❖ **La couche de roulement** :Située en surface, elle garantit l'adhérence des véhicules, le drainage superficiel et la réduction des nuisances sonores.
- ❖ **La couche de liaison** :Elle assure l'imperméabilité de la structure et protège contre la remontée des fissures et les effets du gel.
- ❖ **La couche d'accrochage** :Essentielle pour la durabilité de la chaussée, cette fine couche assure le collage et l'adhésion entre les différentes couches d'enrobés bitumineux.
- ❖ **La conception et la mise en œuvre** rigoureuses de chacune de ces couches sont fondamentales pour garantir la performance et la longévité de l'ensemble de la chaussée.

**Tableau I: Couches de la Structure d'une Chaussée Souple - Rôles et Matériaux Typiques [1].**

Couche	Rôle Principal	Matériaux/Propriétés Typiques
Sol support (PST)	Terrain naturel, support de la structure	Portance < 20 MPa (si insuffisante, drainage/purge nécessaire)
Couche de forme	Circulation d'engins, amélioration portance, drainage, protection gel	Portance PF2 (~50 MPa) à PF4 (~200 MPa)
Couches de base et de fondation	Assise de la chaussée, répartition charges verticales, protection eau/gel	Matériaux granulaires non traités (GNT A, GNT B), granulats artificiels/recyclés
Couche de surface	Sécurité, confort, imperméabilité, résistance mécanique	Enrobés bitumineux (granulats, fines, bitume)
Couche de roulement	Adhérence, drainage, réduction nuisances sonores	Enrobés bitumineux
Couche de liaison	Imperméabilité, protection fissures/gel	Enrobés bitumineux
Couche d'accrochage	Collage entre couches d'enrobés bitumineux	Bitume pur ou émulsion de bitume (250-400 g/m <sup>2</sup> )

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

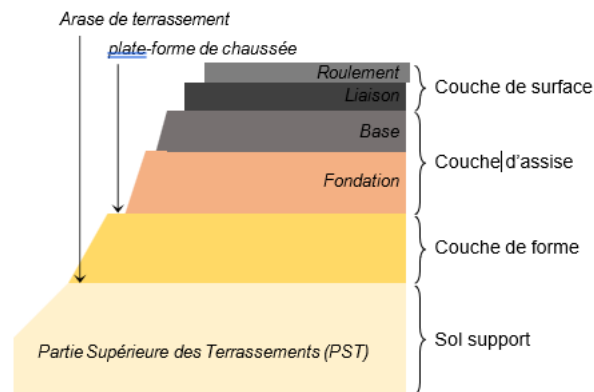


Figure 1 : Structure d'une chaussée souple[1].

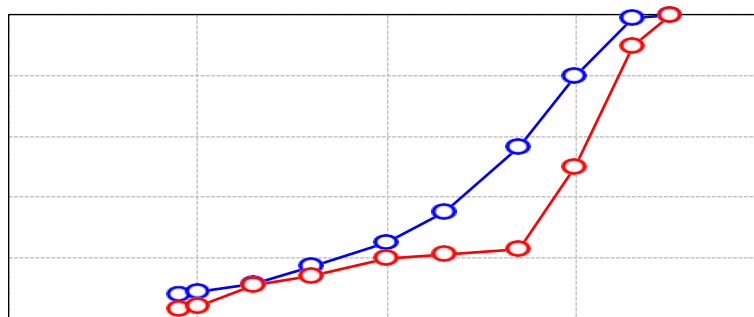


Figure 2:Exemples de courbes granulométriques continue (en bleu) et discontinue (en rouge)

### 1.3 Matériaux Constitutifs des Chaussées Souples

La performance d'une chaussée repose sur les propriétés et la mise en œuvre de ses matériaux constitutifs. Les chaussées souples, majoritairement bitumineuses, utilisent principalement des matériaux granulaires et des enrobés bitumineux. [5].

- ❖ **Matériaux granulaires** : Ces matériaux sont composés de granulats dont les tailles sont choisies en fonction des propriétés mécaniques souhaitées. D'origine naturelle, ils subissent des traitements mécaniques (criblage, concassage) pour ajuster leur granulométrie. La courbe granulométrique, qui représente le pourcentage massique de particules passant à travers des tamis de différentes tailles, peut être continue ou discontinue. Les Graves

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Non Traitées (GNT), utilisées dans les couches de forme et de fondation, se déclinent en GNT A (grave naturelle) et GNT B (Grave Reconstituée Humide). Des granulats artificiels ou recyclés, tels que les laitiers, les fraisâts (Agrégats d'Enrobé - AE) ou les mâchefers, peuvent également être employés. La mise en œuvre des matériaux granulaires est cruciale et comprend le terrassement (étalage en couches de 20 à 30 cm, réglage et nivellement) et le compactage. L'ajustement de la teneur en eau, souvent déterminé par l'essai Proctor, est essentiel pour maximiser la densité et garantir une capacité portante optimale, avec un degré de compacité ( $D_c$ ) devant dépasser 95 % pour une performance durable.

### Enrobés bitumineux :

Également appelés bétons bitumineux, ces matériaux sont fondamentaux en construction routière pour leur résistance à l'eau et leurs propriétés mécaniques. Ils sont principalement utilisés dans les couches supérieures des chaussées.

- **Composition** : Ils sont constitués de granulats (représentant environ 95 % de la masse, sélectionnés pour leur granulométrie et leurs propriétés élastiques), de fines (particules inférieures à 63  $\mu\text{m}$ , qui stabilisent le mélange et améliorent la résistance à l'orniérage), et de bitume. Le bitume est un liant hydrocarboné, solide à température ambiante et liquide à haute température, dont les propriétés peuvent être améliorées par des additifs.
- **Recyclage et alternatives** : Le recyclage des Agrégats d'Enrobé (AE) est une pratique courante, avec des taux d'incorporation pouvant atteindre 30 %. L'utilisation de matériaux alternatifs, tels que certains déchets industriels, est également en augmentation.
- **Fabrication** : Les enrobés sont produits dans des centrales

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

d'enrobage, où les matériaux sont chauffés, mélangés et stockés. On distingue les enrobés à chaud (fabriqués entre 140°C et 180°C) et les enrobés tièdes ou semi-tièdes (entre 100°C et 140°C), ces derniers ayant un impact environnemental réduit.

- **Mise en œuvre** : Elle implique le transport à haute température, l'épandage par finisseur et un compactage adapté aux conditions. Des contrôles qualité rigoureux sont effectués pour vérifier les vides, l'uniformité, l'épaisseur et la macrotecture.

### 1.4 Produits d'accrochage entre couches bitumineuses :

Ces produits, majoritairement à base de bitume (pur ou en émulsion), sont essentiels pour assurer l'adhésion entre les couches d'enrobés. Le choix du type de bitume dépend des enrobés situés de part et d'autre de l'interface. L'application se fait par aspersion, avec un dosage surfacique optimal variant entre 250 g/m<sup>2</sup> et 400 g/m<sup>2</sup>. Un dosage insuffisant compromet l'adhésion, tandis qu'un excès peut créer un plan de glissement, altérant les performances mécaniques de la chaussée. Des dispositifs complémentaires, tels que des géogrilles ou d'autres systèmes anti-remontée de fissures, peuvent être utilisés avec les produits d'accrochage, notamment lors du renforcement de chaussées existantes.

Tableau II: Comparaison des Familles de Structures de Chaussée [2].

Type de Chaussée	Composition Principale	Épaisseur Typique	Comportement Général /
------------------	------------------------	-------------------	------------------------

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

			Caractéristiques Clés
<b>Souples</b>	Revêtement bitumineux mince (<15 cm) sur couches de granulaires non traités (GNT)	30 - 60 cm	Faible répartition latérale des efforts, transmission directe au sol support. Réservées aux voies à très faible trafic (L'aimouche&Ikhlef, 2021).
<b>Bitumineuses Épaisses</b>	Revêtement bitumineux sur assise en matériaux traités aux liants hydrocarbonés	15 - 40 cm (assise)	Performance dépend du collage inter-couches. Déformations liées au fluage (chaleur, trafic lourd lent). Fissures par fatigue en fond de couches (L'aimouche&Ikhlef, 2021).
<b>Semi-rigides</b>	Revêtement bitumineux sur assise traitée aux liants hydrauliques (MTLH)	20 - 50 cm (totale)	Rigidité permettant de répartir les efforts verticaux. Problèmes d'adhérence inter-couches entraînant des contraintes de traction. Solutions anti-fissures pour limiter remontées (L'aimouche&Ikhlef, 2021).
<b>Mixtes</b>	Couche de roulement et base bitumineuses (10-20 cm) sur fondation en MTLH (20-40 cm)	Épaisseur bitumineuse = 0.5 * épaisseur totale	MTLH diffuse les efforts vers le sol support. Couches bitumineuses assurent l'uni et ralentissent les remontées de fissures (L'aimouche&Ikhlef, 2021).
<b>Inverses</b>	Surface bitumineuse	60 - 80 cm (totale)	Rôles spécifiques pour

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

	(~15 cm), base granulaire non traitée (~12 cm), fondation en MTLH		chaque couche : MTLH pour répartition des contraintes, granulaire pour absorber fissurations, bitumineuse pour étanchéité/uni (L'aimouche&Ikhlef, 2021).
<b>Rigides (Béton de Ciment)</b>	Revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide	15 - 40 cm	Absorbent les efforts, peu de transmission au sol. Risque d'« effet de poutre » (fragilisation partie basse par traction). Dilatation thermique peut causer fissures si non maîtrisée par joints (L'aimouche&Ikhlef, 2021).

### 1.5 Sollicitations et Comportement Mécanique des Matériaux Routiers

Les chaussées sont soumises à des sollicitations complexes qui déterminent leur comportement et leur durée de vie. La compréhension de ces sollicitations et des réponses mécaniques des matériaux est fondamentale pour le dimensionnement et le renforcement. [6].

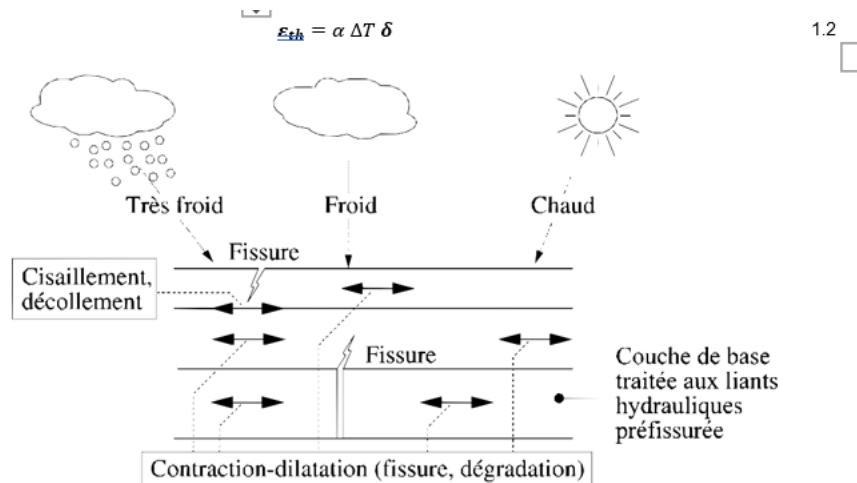


Figure 3: Schématisation des sollicitations induites par la température (Di Benedetto & Corté, 2004) [2]

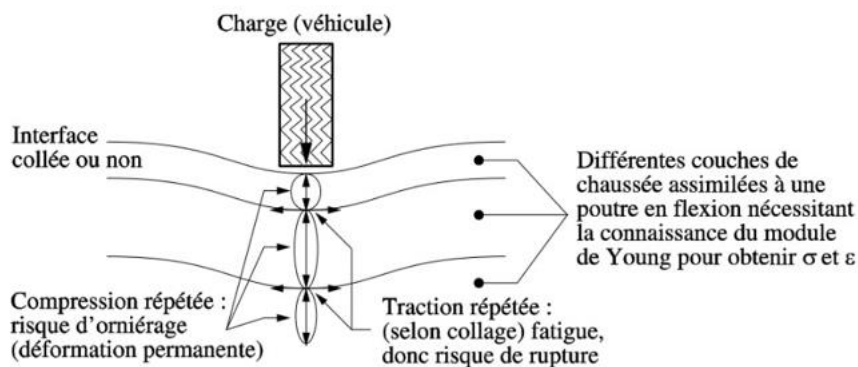


Figure 4: Schématisation des sollicitations induites par le trafic (Di Benedetto & Corté, 2004) [3].

❖ **Sollicitations liées aux contraintes climatiques** : La température est le facteur climatique prédominant dans la dégradation des chaussées. À basse température, la contraction thermique peut provoquer la fissuration des couches liées. La déformation thermique ( $\epsilon_{th}$ ) est proportionnelle au coefficient de dilatation thermique ( $\alpha$ ) et à la variation de température ( $\Delta T$ ) (Di Benedetto & Corté, 2004). Étant donné que la déformation totale est contrainte par le frottement avec les matériaux granulaires, une baisse de température peut augmenter les contraintes jusqu'à la rupture (Di Benedetto & Corté, 2004). De plus, les cycles de température peuvent

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

entraîner une remontée des fissures à travers les couches d'enrobé, se manifestant par des fissures transversales en surface. Ces effets climatiques sont amplifiés par le trafic et le temps, accélérant le vieillissement des produits hydrocarbonés et rendant les surfaces bitumineuses cassantes [7].

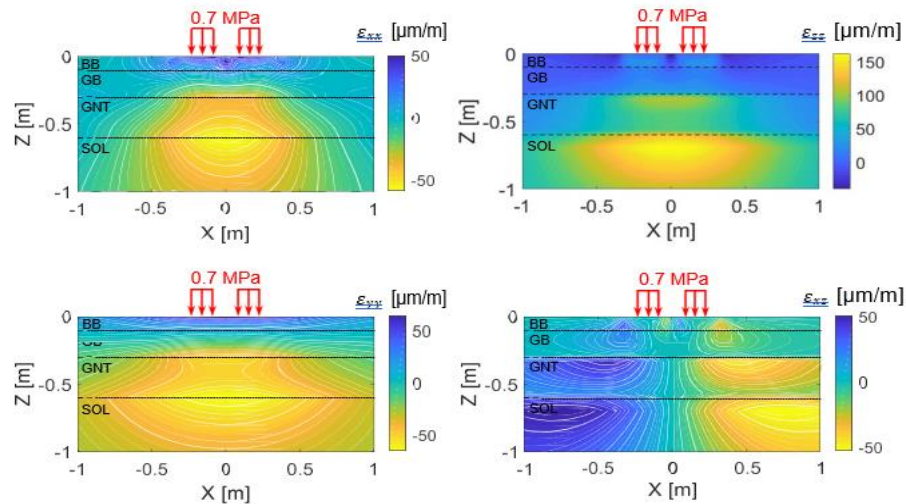


Figure 5: Etat de déformation d'une chaussée sous le chargement d'une roue jumelée standard de 65 Kn [4].

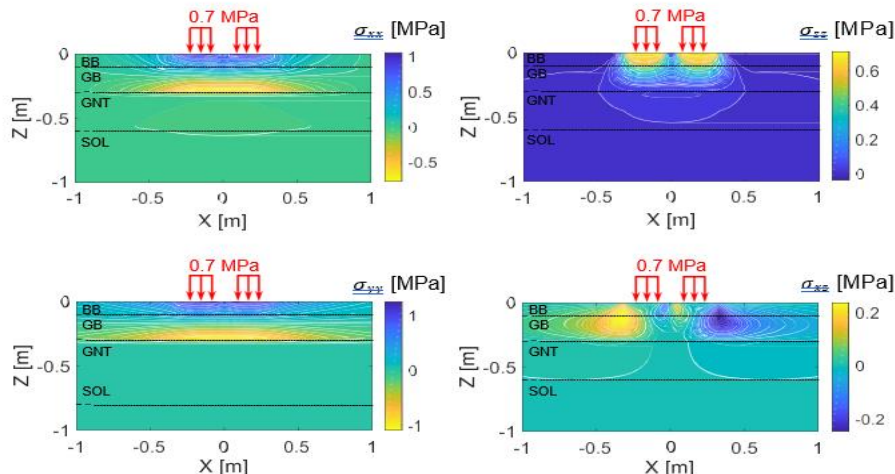


Figure 6: Etat de contrainte d'une chaussée sous le chargement d'une roue jumelée standard de 65 kN[4].

❖ **Sollicitations liées au trafic** : Le passage répété des véhicules sur la chaussée induit de petites déformations (de l'ordre de  $10^{-4}$  m/m), sollicitant les matériaux dans leur domaine linéaire (Di Benedetto & Corté,

2004). Cependant, la répétition de ces charges conduit à une rupture par fatigue (Di Benedetto & Corté, 2004). Une charge verticale appliquée en surface génère des compressions verticales dans les couches et des tractions horizontales à leur base, comparant le comportement des couches à celui de plaques en flexion (Di Benedetto & Corté, 2004). Les états de déformation et de contrainte d'une chaussée sous une charge standard (roue jumelée de 65 kN) montrent une diffusion latérale de la contrainte verticale ( $\sigma_{zz}$ ), des contractions et compressions au sommet des couches bitumineuses, et des tractions et extensions à leur base (Di Benedetto & Corté, 2004). Des déformations verticales ( $\epsilon_{zz}$ ) importantes sont observées au sommet des couches granulaires, tandis que les déformations et contraintes de cisaillement se concentrent aux bords de la charge (Di Benedetto & Corté, 2004). Lorsque la charge se déplace, chaque point de la chaussée subit des contraintes et déformations, provoquant des rotations des axes principaux qui peuvent endommager la structure (Lekarp & Dawson, 1998). Les charges en accélération, freinage ou virage génèrent des efforts horizontaux, contribuant à la dégradation de la surface (Hammoum, 2010). Les charges à essieux multiples, en raison de la viscoélasticité des matériaux bitumineux, entraînent une accumulation de déformations (Wang et al., 2018).

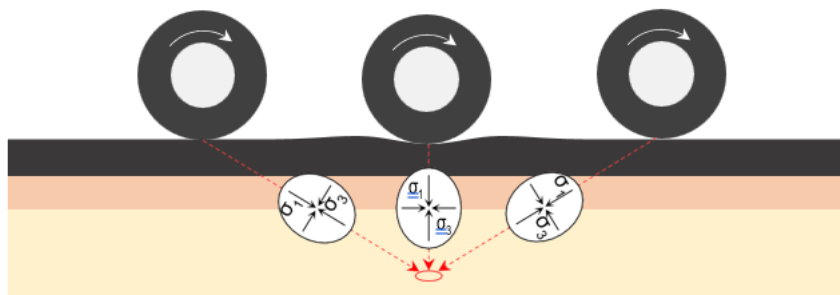


Figure 7: Directions des contraintes principales au passage d'une charge roulante (reproduit de Doré (2009)) [5].

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

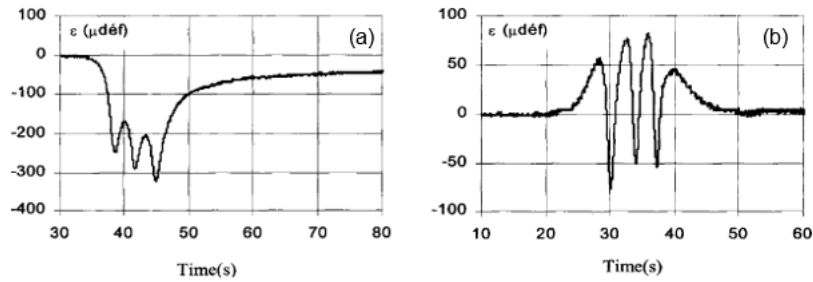


Figure 8: Déformations selon les directions (a) transversale et (b) longitudinale au passage d'un boggie à trois essieux (LCPC-Airbus-STBA, 2001) [5].

### 1.6 Comportement mécanique des matériaux routiers .

#### 1.6.1 Matériaux non liés :

Pour de très faibles déformations, le module de cisaillement ( $G$ ) des matériaux non liés (sables, argiles) varie peu, mais il diminue pour des amplitudes plus élevées, révélant un comportement non linéaire (Hardin & Drnevich, 1972). L'amortissement ( $D$ ), faible aux petites déformations, augmente avec l'amplitude, traduisant une dissipation d'énergie (Hardin & Drnevich, 1972). Les modules apparents des couches granulaires varient significativement avec les changements de température, hors effets de gel [8].

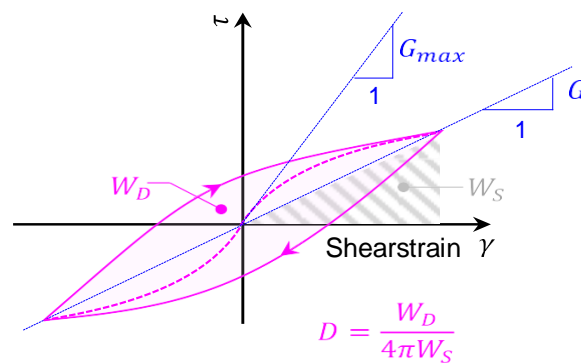
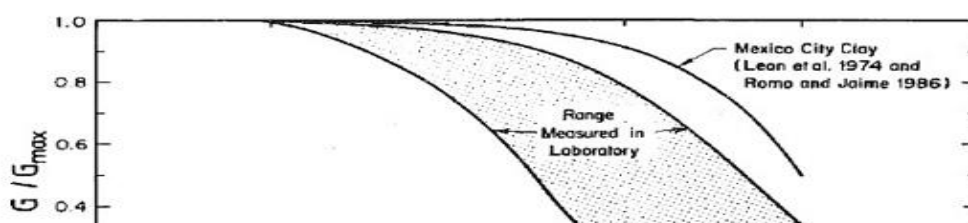


Figure 9: Définition du module de cisaillement  $G$  et du ratio d'amortissement  $D$  sous sollicitation



### 1.6.2 Mélanges bitumineux :

Ils possèdent une rhéologie complexe, avec des comportements variant selon les conditions de chargement et environnementales (Di Benedetto & Corté, 2004). Ils sont très sensibles aux variations thermiques : une différence de 1°C peut modifier leur module d'environ 10 %. À petites déformations (inférieures à  $10^{-4}$  m/m), le comportement est viscoélastique linéaire ou de fatigue.

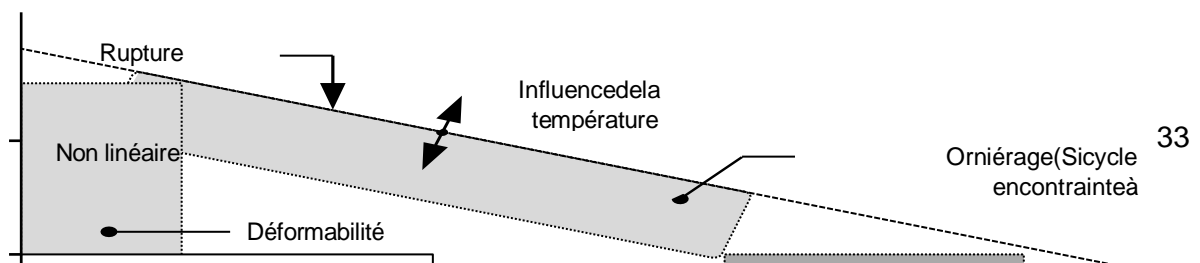


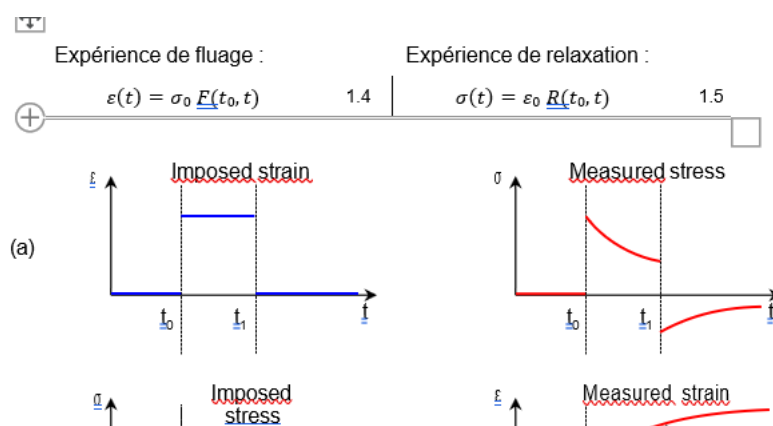
Figure 11: Domaines de comportement des matériaux bitumineux (Di Benedetto & Corté, 2004)

### 1.6.3 Viscoélasticité linéaire :

Typique du bitume, elle se manifeste par des réactions différées dans le temps par rapport aux sollicitations appliquées. Les propriétés mécaniques (module et angle de phase) varient en fonction de la vitesse ou de la fréquence de sollicitation. Le comportement linéaire des matériaux bitumineux repose sur le principe de superposition de Boltzmann, où la réponse à un chargement multiple est la somme des réponses individuelles.

### 1.6.4 Fatigue :

La résistance à la fatigue est cruciale pour le dimensionnement des chaussées, car les couches liées se dégradent principalement par rupture en fatigue à leur base (Di Benedetto et al., 2004). Ce phénomène survient sous de petites déformations après un grand nombre de cycles de chargement ( $N > 10^4$ ), entraînant une rupture progressive. Les essais de fatigue révèlent trois phases : adaptation (diminution rapide du module), quasi-stationnaire (diminution linéaire du module par fatigue), et rupture (propagation des fissures).



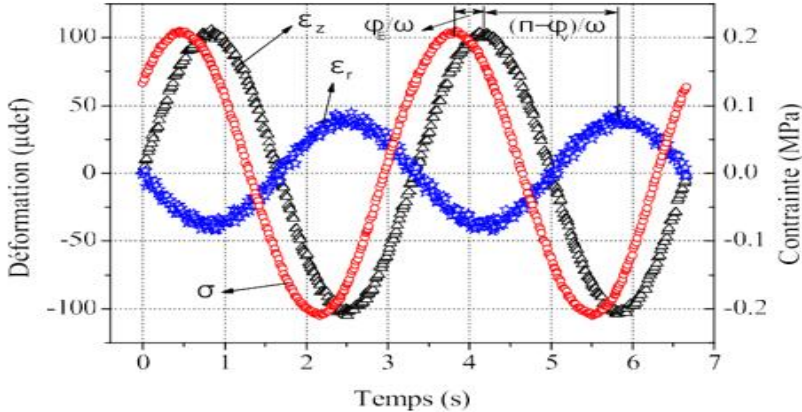


Figure 13: Signaux de contrainte et de déformations axiale et radiale mesurés lors d'un essai de module complexe sur éprouvette cylindrique à 20.8°C et 0.3 Hz [5].

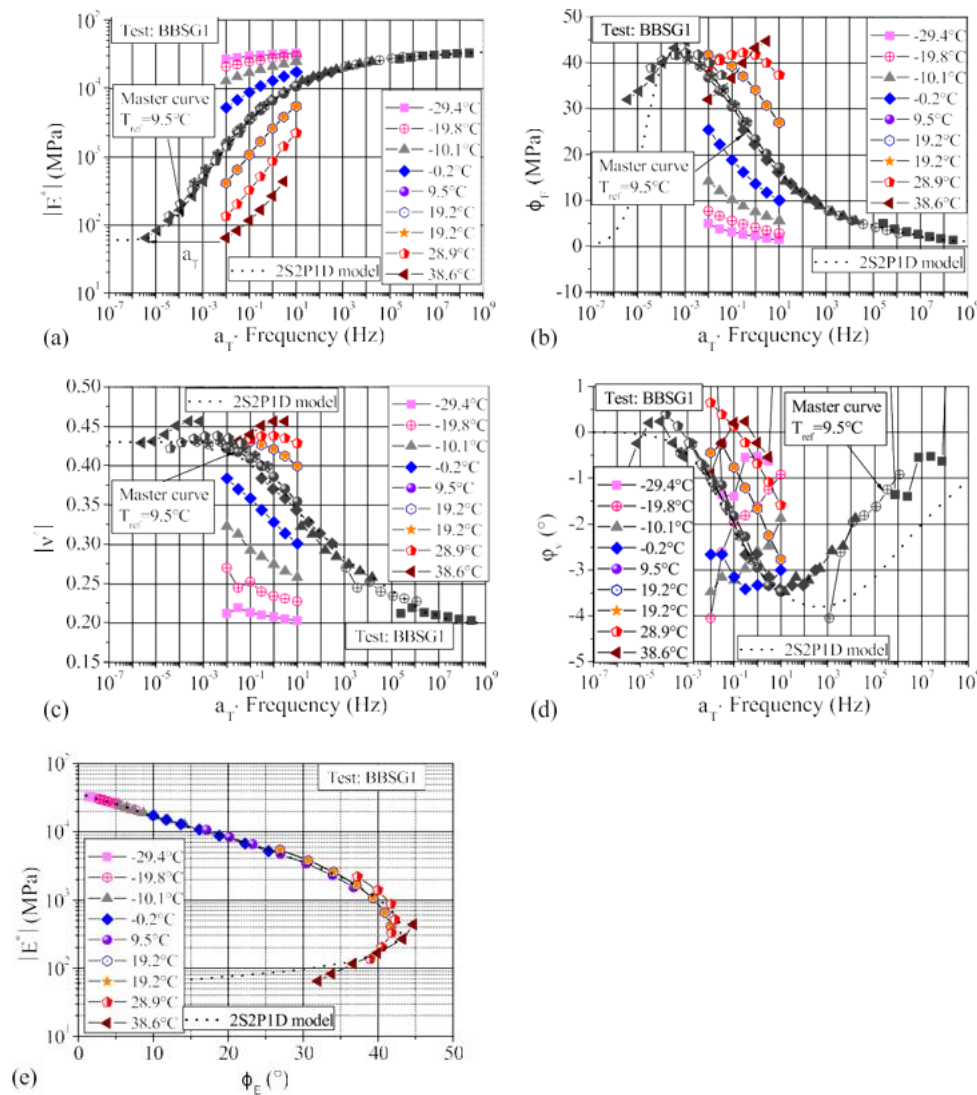


Figure 14: Essai de module complexe et modélisation 2S2P1D [5].

- (a) isothermes et courbe maîtresse de la norme de  $E^*$ ;
- (b) isothermes et courbe maîtresse de l'angle de phase de  $E^*$ ;
- (c) isothermes et courbe maîtresse de la norme de  $v^*$ ;
- (d) isothermes et courbe maîtresse de l'angle de phase de  $v^*$ ;
- (e) Espace de Black. (Q. T. Nguyen, 20

### 1.6.5 Interfaces entre couches de chaussée :

Le collage des couches de chaussée en matériaux bitumineux, réalisé avec du bitume, suggère un comportement viscoélastique linéaire des interfaces. Leur comportement en cisaillement dépend de la température et de la fréquence de chargement [10]. Les essais de fatigue montrent que la qualité du collage évolue avec le nombre de sollicitations, conduisant à des propositions d'intégrer la

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

fatigue des interfaces dans le dimensionnement. Les interfaces sont souvent modélisées comme une fine couche viscoélastique, bien que certains modèles viscoélastiques linéaires puissent sous-estimer l'angle de phase.

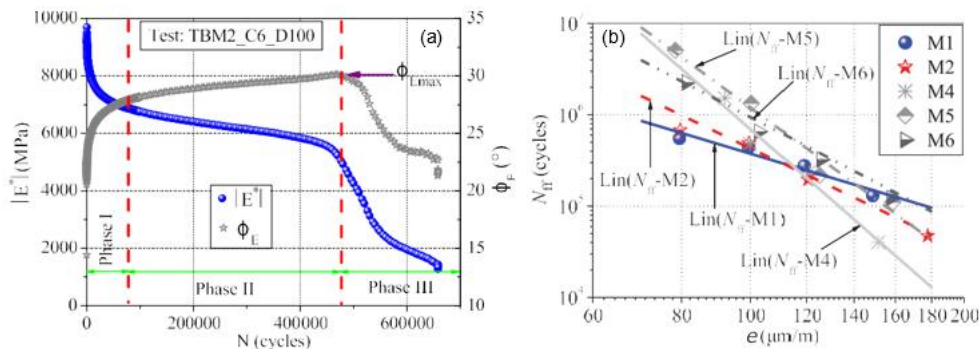


Figure 15: Essais de fatigue à 10°C et 10 Hz : (a) Evolution de la norme et de l'angle de phase du module complexe au cours d'un essai de fatigue sur enrobé bitumineux (Tapsoba, Sauzéat, & Di Benedetto, 2013) ; (b) Courbes de Wöhler déduites en utilisant six crit [5].

### 1.7 Méthodes de calcul des chaussées :

Le calcul de la réponse des chaussées est essentiel pour le dimensionnement, l'auscultation et le renforcement [11].

#### 1.7.1 Méthodes élastostatiques (Boussinesq et Burmister) :

Boussinesq (1885) a résolu le problème d'une charge circulaire sur un massif élastique homogène. a étendu cette solution à une chaussée à plusieurs couches. Ces méthodes, basées sur l'hypothèse de linéarité des matériaux, permettent d'étendre un calcul sous charge unitaire à toute amplitude et d'obtenir la réponse à un chargement complexe par sommation.

CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

$$\underline{\sigma_{zz}}(z, r = 0) = Q \left( 1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right) \tag{1.41}$$

$$\underline{d}(r = 0) = \frac{2Qa(1 - \nu^2)}{E} \quad \text{et} \quad d(r > 0) = \frac{2Qa^2(1 - \nu^2)}{E r} \tag{1.42}$$

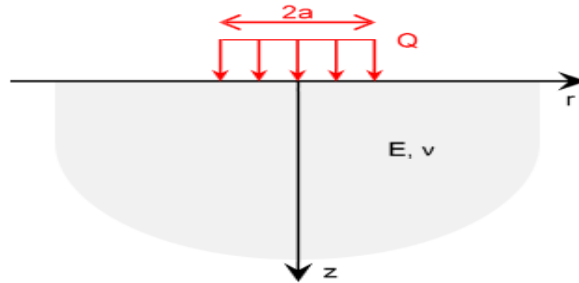


Figure 16: Géométrie du massif de Boussinesq [6].

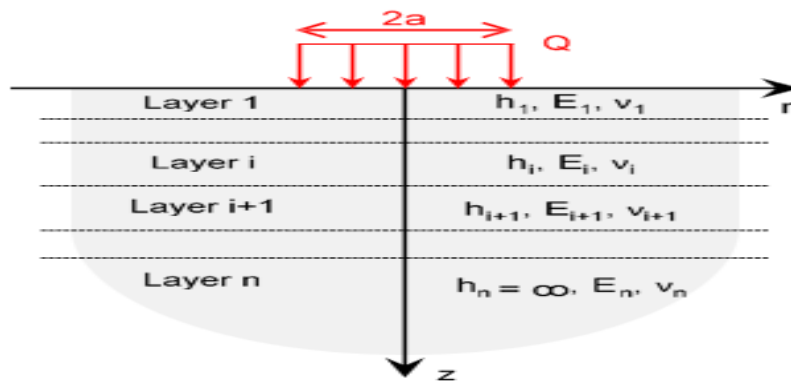


Figure 17: Applications de la méthode de Boussinesq : (a) contrainte verticale ; (b) déflexion[6].

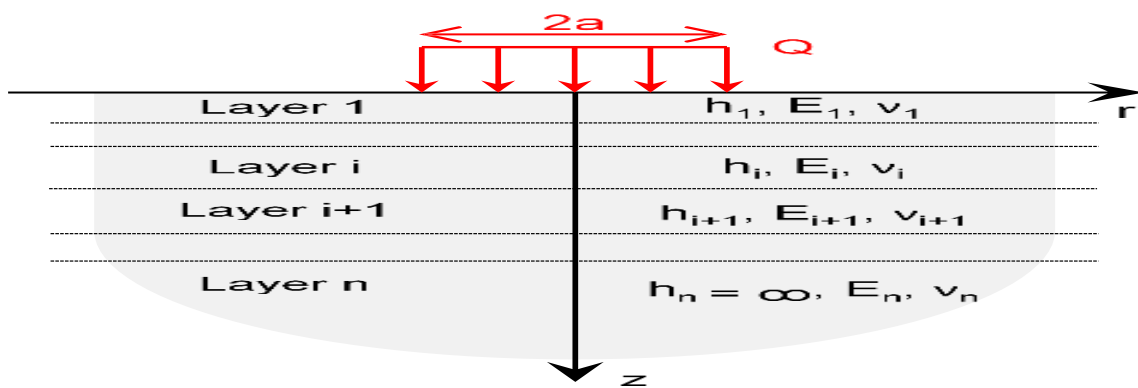


Figure 18: Massif multicouche utilisé pour le calcul selon la méthode de Burmister[6].

### 1.7.2 Méthode des Éléments Finis (MEF) :

C'est une technique numérique flexible pour résoudre les équations aux dérivées partielles, permettant de traiter diverses géométries, comportements rhéologiques (élasticité, viscoélasticité, non-linéarités) et conditions d'interface complexes. La MEF est utilisée dans les domaines temporel et fréquentiel, particulièrement adaptée aux problèmes dynamiques.

### 1.7.3 Méthode des Éléments Spectraux (MES) :

Une approche fréquentielle pour modéliser la propagation des ondes dans les chaussées, utilisée pour simuler les essais FWD et les chargements roulants.

### 1.8 Dimensionnement rationnel (méthodes françaises) :

Pour les chaussées routières, il est basé sur un essieu de référence (130 kN) et des critères de fatigue (fissuration) et d'orniérage (déformation verticale). Pour les chaussées aéroportuaires, il prend en compte des charges élevées (jusqu'à 30 t) et l'effet de balayage. Une validation expérimentale (manège de fatigue, essais en vraie grandeur) est utilisée pour corriger les modèles [12].

Les interactions entre les couches de chaussée, régies par les propriétés mécaniques de leurs matériaux constitutifs, déterminent la performance globale de la chaussée. Par exemple, la qualité de la couche d'accrochage est cruciale ; sa dégradation peut entraîner un délaminage, altérant le transfert de charge et accélérant la fatigue des couches supérieures. Cela signifie que les stratégies de renforcement doivent considérer non seulement la résistance des couches individuelles, mais aussi l'intégrité des interfaces entre elles.

Les sollicitations climatiques et celles liées au trafic ne sont pas des phénomènes isolés, mais interagissent de manière synergique. Les cycles de température créent des contraintes thermiques et des microfissures, qui deviennent ensuite des points d'amorçage pour la fissuration par fatigue sous

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

l'effet du trafic répété. L'infiltration d'eau, facilitée par ces fissures, affaiblit davantage les matériaux granulaires non liés et provoque le désenrobage des couches bitumineuses. L'adage "L'eau est l'ennemi premier de la route" souligne l'importance primordiale du drainage et de l'étanchéité pour la durabilité des chaussées. Toute solution de renforcement à long terme doit donc intégrer une gestion efficace de l'eau.

La viscoélasticité et la fatigue sont des mécanismes fondamentaux de dégradation des matériaux bitumineux sous chargement répété. La viscoélasticité explique les déformations différées et la sensibilité à la température, tandis que la fatigue mène directement à la rupture structurelle par accumulation de dommages. Les matériaux et techniques de renforcement doivent être conçus pour contrecarrer ces comportements dépendants du temps et de la charge, soit en augmentant la rigidité pour réduire la déformation, soit en améliorant la résistance à la fatigue.

Enfin, les méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis, sont devenues indispensables pour comprendre le comportement complexe des chaussées. Alors que les méthodes analytiques fournissent une base théorique, les outils numériques permettent de capturer les comportements non linéaires, dynamiques, les géométries complexes, les charges multi-essieux et les conditions d'interface, ce qui est difficilement réalisable avec des solutions analytiques. Ces outils sont essentiels pour prédire et optimiser avec précision le renforcement des chaussées, en particulier avec l'utilisation de matériaux composites anisotropes [13].

### 1.8.1 Panorama des Méthodes de Renforcement Traditionnelles

Historiquement, la solution unique pour les ouvrages présentant des déficiences structurelles était la démolition et la reconstruction totale. Cependant, au cours des dernières décennies, les travaux de renforcement et de

réhabilitation ont connu un développement considérable en termes de méthodes et de matériaux.

### 1.8.2 Le chemisage :

Cette méthode traditionnelle est l'une des plus couramment utilisées pour renforcer ou réparer les éléments en béton armé. Elle implique une augmentation des sections du béton existant par l'ajout de béton armé ou d'acier. La section supplémentaire permet aux éléments structurels de transférer plus de charge tout en offrant la ductilité, la résistance et la stabilité manquantes.

### 1.8.3 Chemisage en acier :

Développé pour les colonnes, il consiste à ajouter des plaques d'acier remplies de coulis de ciment ou de béton pour assurer la continuité structurelle. Bien qu'efficace, cette technique est coûteuse et nécessite une main-d'œuvre qualifiée. Elle est également déconseillée pour les piles de ponts immergées en raison de sa vulnérabilité à la corrosion.

### 1.8.4 Chemisage en béton :

Il s'agit d'ajouter une couche épaisse de béton armé autour d'un élément (ex: poteau) pour augmenter sa résistance à la flexion, sa ductilité et sa résistance au cisaillement. Cette méthode est moins coûteuse et demande moins de main-d'œuvre professionnelle, mais elle augmente le poids de la structure, nécessite des coffrages et est plus longue à mettre en œuvre.

### 1.8.5 Le renforcement avec plaques en acier :

Cette technique, développée il y a plus de cinquante ans, consiste à coller des plaques d'acier d'une épaisseur calculée sur des éléments en béton armé (poutres, tabliers de ponts) à l'aide d'un adhésif, et à les ancrer dans les éléments à renforcer. Elle garantit un meilleur transfert des efforts et augmente la résistance (au cisaillement, à la flexion et à la compression) et la rigidité de la pièce renforcée. Cependant, cette méthode présente des inconvénients majeurs :

## CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

une lourdeur de mise en œuvre, la nécessité de moyens de manutention importants, des difficultés pour les surfaces non droites, un problème de corrosion si la plaque n'est pas bien protégée, et un risque de décollement de la plaque.

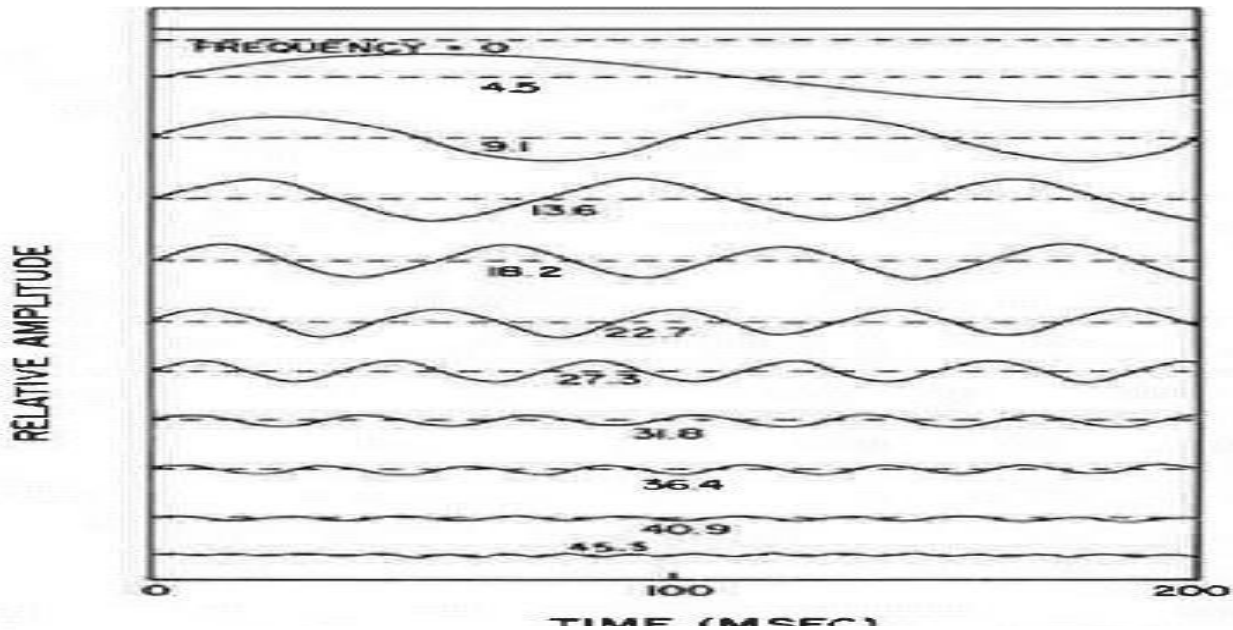


Figure 19: Composantes harmoniques d'une charge FWD (Sebaaly, Mamlouk, & Davis, 1986) [7].

### 1.8.6 Le renforcement par précontrainte externe :

C'est une technique plus récente visant à pallier les inconvénients du chemisage en béton ou en acier, notamment pour les piles de ponts dans l'eau (Mesegmine & Houari, 2022). Elle implique d'encercler les colonnes avec des bandes de torons d'acier munies d'un élément d'ancrage, apportant une précontrainte additionnelle et une pression latérale active.

### Conclusion

Ce chapitre a dressé un panorama des connaissances fondamentales sur les chaussées routières, en détaillant leur structure multicouche, les matériaux qui les composent et leur comportement sous les sollicitations du trafic et des conditions climatiques. Nous avons exploré les mécanismes complexes de la viscoélasticité et de la fatigue des matériaux bitumineux, ainsi que l'importance des interfaces entre les couches pour la performance globale de la chaussée [14]. Les méthodes de calcul, des approches élastostatiques classiques aux outils numériques avancés comme la méthode des éléments finis, ont été présentées comme des instruments essentiels pour le dimensionnement et l'analyse. Enfin, une revue des méthodes de renforcement traditionnelles, telles que le chemisage et le collage de plaques en acier, a mis en évidence leurs avantages et leurs limites, soulignant la nécessité de solutions plus innovantes et durables. Cette compréhension approfondie des chaussées et des techniques de renforcement conventionnelles constitue une base solide pour aborder, dans le chapitre suivant, les pathologies spécifiques qui affectent ces infrastructures et les solutions modernes offertes par les matériaux composites [15].

## Chapitre 2 : Majeures dégradations constatées dans le domaine des routes

## 2.1 Introduction

Sous l'effet des charges de trafic, des conditions climatiques et du vieillissement des matériaux, les chaussées subissent une dégradation progressive. Ces détériorations, de nature variée, résultent de multiples facteurs. L'évaluation de l'état des chaussées repose sur des mesures techniques et des inspections visuelles, permettant d'analyser la structure, d'identifier les causes des désordres observés et de proposer les solutions les plus adaptées. Dans ce chapitre, nous examinerons les différents types de dégradations rencontrées sur les chaussées ainsi que leurs causes probables [16].

## 2.2 Majeures dégradations constatées dans le domaine des routes

Les chaussées sont des structures dynamiques dont l'état se dégrade inévitablement au fil du temps sous l'effet de diverses sollicitations. Comprendre la nature et les causes de ces dégradations est primordial pour élaborer des diagnostics précis et choisir les techniques de réparation et de renforcement les plus adaptées [17].

## 2.3 Causes des Désordres

La dégradation des chaussées est un processus progressif qui transforme un état acceptable en un état dégradé, sous l'action combinée du trafic, des intempéries et du vieillissement des matériaux [18].



Figure 20: les majeures dégradations des routes[8].

### 2.3.1 Causes liées au trafic :

Le passage répété des véhicules, en particulier des poids lourds, entraîne une usure progressive des revêtements. Les chaussées sont conçues pour supporter un trafic donné sur une durée de service déterminée. Cependant, toute sous-épaisseur, qu'elle soit localisée ou généralisée, engendre dès la mise en service une sursollicitation de la structure. À long terme, ce défaut se manifeste par l'apparition prématurée de fissures ou de faïençage, surtout si les matériaux utilisés sont rigides [19]. Le trafic lourd est également à l'origine de l'orniérage (par compression des matériaux bitumineux et déformation des couches non liées) et de la fatigue par accumulation de micro-dégradations [20].



Figure 21: sur sollicitation des routes[5].

### 2.3.2 Causes liées au climat :

Les conditions météorologiques ont un impact significatif sur les matériaux routiers [21].

### 2.3.3 Gel et dégel :

Lorsque l'eau s'infiltré dans les fissures de la chaussée, elle gèle, augmentant de volume et exerçant une pression sur la structure. Lors du dégel, la fonte de la glace laisse des cavités, fragilisant le revêtement. Ce phénomène est aggravé si l'eau pénètre le corps de chaussée par infiltration ou remontée capillaire, réduisant la portance du sol et dégradant certains granulats. Les matériaux bitumineux sont vulnérables au désenrobage, où l'eau s'infiltré entre granulats et liant en cas d'adhésion insuffisante. Des ravinements peuvent se former en bordure de chaussée si les accotements ne sont pas protégés.



Figure 22: effet du gel et dégel sur la route [5].

### 2.3.3 Précipitations (pluie, neige, grêle) :

Elles provoquent l'érosion de surface (rendant le revêtement glissant), le ravinement (creusement de sillons) et l'infiltration d'eau dans les fissures, accélérant la dégradation.

Rayons ultraviolets (UV) : Les UV dégradent le bitume, réduisant sa souplesse, sa résistance et son adhérence, ce qui accélère le vieillissement et provoque fissurations et décollements de l'enrobé [22]. Les effets climatiques sont amplifiés par le trafic et le temps, rendant les surfaces bitumineuses cassantes et sujettes à la fissuration et l'effritement. L'adage "L'eau est l'ennemi premier de la route" souligne l'importance capitale du drainage et de l'étanchéité pour la durabilité des chaussées.



Figure 23: l'effet des précipitations sur la route [5].

### 2.3.4 Causes liées aux matériaux :

La qualité des matériaux est déterminante. Un défaut de conception ou de mise en œuvre entraîne des dégradations prématurées. Le compactage insuffisant réduit la rigidité et accélère la fatigue sous charges lourdes. Un mauvais choix des matériaux peut provoquer une déformation du squelette granulaire sous trafic.



Figure 24: arrachements de chaussée [5].

## 2.4 Causes d'origine mécanique (au-delà du trafic) :

### 2.4 .1 Séisme :

Les séismes induisent des efforts importants dans les structures. Les endommagements peuvent inclure des ruptures par cisaillement des piles, des échappements d'appui dus aux entrechoquements ou tassements différentiels, et des dommages aux éléments en béton sous l'effet de flexion.

### 2.4.2 Choc :

Des chocs violents (véhicules sur piles/tabliers, bateaux sur piles) peuvent engendrer des désordres importants, voire l'effondrement d'ouvrages.

### 2.4.3 Incendie :

Bien que le béton ait une bonne résistance au feu, une exposition prolongée peut modifier et dégrader les caractéristiques des matériaux, entraînant l'éclatement, l'écaillage, la diminution des propriétés mécaniques et la fusion [23].

## 2.5 Causes d'origine chimique :

### 2.5.1 Carbonatation :

Réaction entre l'hydrate de chaux du ciment et le CO<sub>2</sub> de l'air, formant du calcaire et abaissant le pH du béton, ce qui initie la corrosion des aciers.

### 2.5.2 Alkali-réaction :

Réaction entre les alcalins du ciment et les particules réactives des granulats, formant un gel qui absorbe l'eau et provoque un gonflement du béton, entraînant des fissurations (faïençage, réseaux).

### 2.5.3 Attaques des sulfates :

Réactions des sulfates avec la chaux et les aluminates du ciment, formant de l'ettringite qui provoque une expansion et altère les propriétés mécaniques du béton.

### 2.5.4 Réactions des chlorures :

Les chlorures attaquent la couche de passivation de l'acier, provoquant une corrosion localisée et une réduction significative de la section d'armature.

### 2.5.5 Corrosion :

La corrosion des armatures est un désordre fréquent, altérant la durabilité, la résistance et la stabilité des ouvrages. Elle se manifeste par des éclatements, épaufrures et fissures du béton d'enrobage, et en stade avancé, par une perte de section des armatures [24].

## 2.6 Causes d'origine physique :

- **Retrait** :Phénomène physico-chimique dans le béton dû à une humidité insuffisante, se manifestant par des fissures orientées ou multidirectionnelles.
- **Gel-dégel** :Les cycles de gel-dégel affaiblissent le béton, causant des dommages internes comme l'écaillage et l'éclatement par l'expansion de l'eau dans les pores et fissures.

## 2.7 Erreurs de conception, calculs, exécution :

### 2.7.1 Erreurs de conception :

Bien que moins fréquentes pour les ouvrages récents, les simplifications de modélisation peuvent entraîner des désordres. Les anciens ouvrages, conçus avec une maîtrise moindre du calcul et de la géotechnique, présentent souvent de nombreux problèmes.

### 2.7.2 Erreurs de calculs :

Des erreurs de dimensionnement peuvent entraîner des fissures (traction, torsion, cisaillement) ou l'éclatement du béton (compression).

### 2.7.3 Erreurs d'exécution :

Souvent dues à un manque de détails d'exécution, au non-respect des dispositions constructives ou à un contrôle qualité insuffisant. Ces défauts peuvent ne pas causer une rupture immédiate mais conduisent à une détérioration progressive.

Les causes de dégradation sont rarement isolées ; elles interagissent souvent de manière complexe. Par exemple, un compactage insuffisant des matériaux rend une chaussée plus vulnérable à l'orniérage sous trafic lourd, et ces ornières peuvent ensuite retenir l'eau, accélérant le désenrobage. Cette interconnexion des facteurs de dégradation souligne la nécessité d'une approche diagnostique

holistique, plutôt que de traiter les symptômes de manière isolée.

## 2.8 Typologie Détaillée des Dégradations

Les désordres observés sur les chaussées peuvent être classés en deux catégories principales : les dégradations superficielles, qui affectent la couche de roulement, et les dégradations structurelles, qui impactent le corps de chaussée ou son support. L'évaluation de ces dégradations repose sur des critères d'étendue (surface ou longueur affectée) et de gravité (faible, moyenne, majeure) [25].

### 2.8.1 Fissurations :

- **Fissures transversales** :Orientées perpendiculairement à l'axe de la route, isolées ou périodiques. Elles sont typiques des chaussées semi-rigides et sont principalement causées par les contraintes thermiques, le retrait des liants hydrauliques, le vieillissement du bitume, l'effet du trafic lourd ou un joint de construction mal exécuté.



Figure 25: Fissures transversales [5].

- **Fissures longitudinales** :Ruptures parallèles à l'axe de la route, soit dans les bandes de roulement (causées par la fatigue du revêtement, une capacité structurale insuffisante, un mauvais drainage), soit hors des bandes de roulement (dues à un joint de construction défectueux, une ségrégation de l'enrobé, un vieillissement du revêtement).



Figure 26: Fissures longitudinales [5].

- **Fissures en dalle** :Réseau de fissures longitudinales et transversales formant un maillage rectangulaire (mailles  $\leq 2$  m).



Figure 27: Fissures en dalle [5].

- **Fissures de joint** :Apparaissent le long des joints longitudinaux mal réalisés lors de la pose d'enrobés à chaud.



Figure 28: Fissures de joint [5].

**Fissures d'adaptation** : Provoquées par des mouvements de sols (tassements, glissements), le retrait hydrique ou la dégradation des élargissements.



*Figure 29: Fissures d'adaptation [5].*

- **Fissures diverses** : Formes anarchiques (paraboliques, en étoile, en Y).
- **Fissures obliques (chaussées en béton)** : Cassures reliant deux côtés adjacents d'une dalle, causées par la fatigue de la structure, un mauvais appui ou le retrait thermique.
- **Faiénçage (peau de crocodile)** : Réseau de fissures formant des mailles. Mailles fines (10-40 cm) dans les bandes de roulement (décollement de la couche de surface, fatigue excessive de l'assise). Mailles larges (> 40 cm) ou fines hors bandes de roulement (polygones irréguliers). Faiénçage circulaire (zone localisée) dû à la ségrégation des matériaux, au cisaillement du trafic lourd, aux défauts ponctuels ou à l'excès/manque d'eau.



Figure 30: Faiençage [5].

### 2.8.2 Déformations :

- **Orniérage** :Déformation longitudinale par fluage des couches bitumineuses superficielles (petit rayon,  $< 80$  cm, dû à un compactage insuffisant, une résistance inadaptée, une usure prématurée) ou tassement des couches granulaires non traitées (grand rayon,  $> 80$  cm, dû à une capacité portante insuffisante, un drainage défectueux, un compactage insuffisant).

➤



Figure 31: Ornières à petit rayon [5].



Figure 32: Ornières à grand rayon[5].

- **Affaissement de rive** : Distorsion du profil en bordure de chaussée. Causé par un sous-dimensionnement, des matériaux de remblai mal compactés, une dégradation des réseaux souterrains, une instabilité des remblais latéraux.



Figure 33: Affaissement de rive [5].

- **Flache (affaissement ponctuel)** : Déformation localisée de forme circulaire.

### 2.8.3 Arrachements (désintégration de surface) :

- **Désenrobage** : Perte progressive d'adhésion entre granulats et liant bitumineux, entraînant la disparition du mastic. Causé par une mauvaise qualité d'enrobage, un compactage insuffisant, un sous-dosage en bitume,

le vieillissement par oxydation, ou la stagnation d'eau.



Figure 34: Désenrobage [5].

- **Pelade** :Arrachement par plaques de la couche de roulement superficielle. Causes : épaisseur insuffisante, mauvaise adhérence entre couches, sollicitations excessives, absence de couche d'accrochage.



Figure 35: Pelade [5].

- **Nid de poule** :Cavités circulaires. Causes : sollicitations intenses, épaisseur inadaptée, faiblesse localisée de la fondation, stade ultime de dégradations non traitées.
-



Figure 36: Nid de poule [5].

- **Plumage (ou peignage) :** Arrachement partiel des gravillons de surface.  
Causes : action corrosive de l'eau, granulats inadaptés, ségrégation des matériaux.
- **Tête de chat :** Apparition de pierres dures saillantes après usure de la couche de roulement.



Figure 37: Plumage [5].

- **Remontées (migration de matériaux) :**  
**Remontées de boue :** Migration de matériaux fins argileux à travers les fissures.



Figure 38: Remontées de boue [5].

- **Remontées d'eau** :Infiltration d'eau due à un drainage déficient ou une perméabilité excessive de la couche de surface.



Figure 39: Remontées d'eau [5].

- **Ressuage** :Exsudation de bitume en surface. Causes : sollicitations répétées, températures élevées, surdosage en liant, formulation inadaptée, excès de liant d'accrochage.

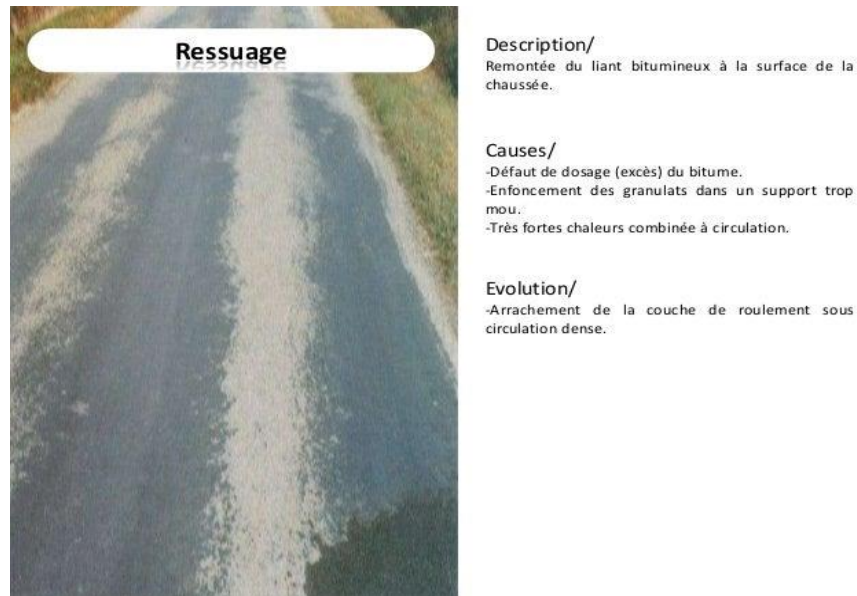


Figure 40: Ressuage [5].

### 2.7.3 Dégradations spécifiques en milieu urbain .

- **Fissuration périphérique des regards :**Rupture circulaire autour des ouvrages d'accès aux réseaux. Causes : perte de matériaux adjacents, cycles gel-dégel, tassement différentiel, impacts dynamiques.



Figure 41: Dénivellation des regards et puisards [5].

- **Coupes et tranchées :**Fissurations ou affaissements le long des tranchées. Causes : défaut d'étanchéité des joints de reprise, compactage insuffisant des remblais, perte de support latéral.
- **Dénivellation des regards et puisards :**Décalage vertical entre le

revêtement et les ouvrages. Causes : gel-dégel, tassement différentiel, érosion, compactage insuffisant.

- **La gravité des dégradations** n'est pas seulement une classification, mais un indicateur de la progression des dommages. Une dégradation initialement "faible" peut évoluer vers un état "moyen" puis "majeur" si elle n'est pas traitée, entraînant des coûts de réparation exponentiellement plus élevés et des risques accrus pour la sécurité. Cela met en évidence l'importance économique et sécuritaire des interventions préventives et précoces.

**Tableau III: Résumé des Types et Causes des Dégradations des Chaussées [3].**

Catégorie de Dégradation	Type Spécifique	Causes Principales
<b>Fissurations</b>	Transversales	Retrait thermique, vieillissement bitume, trafic lourd, joint mal exécuté (IbroMaiguizo, 2012)
	Longitudinales	Fatigue du revêtement, capacité structurale insuffisante, mauvais drainage, joint défectueux, vieillissement (IbroMaiguizo, 2012)
	En dalle	Réseau de fissures (mailles rectangulaires) (IbroMaiguizo, 2012)
	Faïençage (peau de crocodile)	Décollement couche surface, fatigue assise, ségrégation, cisaillement, défauts ponctuels, problèmes d'eau (IbroMaiguizo, 2012)
<b>Déformations</b>	Orniérage (petit rayon)	Compactage insuffisant, résistance inadaptée, usure prématurée (IbroMaiguizo, 2012)
	Orniérage (grand rayon)	Capacité portante

		insuffisante, drainage défectueux, compactage base insuffisant (IbroMaiguizo, 2012)
	Affaissement de rive	Sous-dimensionnement, remblai mal compacté, dégradation réseaux souterrains ( IbroMaiguizo, 2012)
	Flache	Enfoncement ponctuel localisé
<b>Arrachements</b>	Désenrobage	Mauvaise qualité enrobage, compactage insuffisant, sous-dosage bitume, vieillissement, stagnation eau (.;IbroMaiguizo, 2012)
	Pelade	Épaisseur insuffisante couche surface, mauvaise adhérence inter-couches, trafic excessif, manque couche accrochage ( IbroMaiguizo, 2012)
	Nid de poule	Sollicitations intenses, épaisseur inadaptée, faiblesse fondation, dégradations non traitées ( IbroMaiguizo, 2012)
	Plumage	Eau corrosive, granulats inadaptés, ségrégation
	Tête de chat	Usure couche de roulement exposant pierres dures
<b>Remontées</b>	De boue	Action dynamique trafic, présence d'eau infiltrée
	D'eau	Drainage déficient, perméabilité excessive surface
	Ressuage	Trafic répété, hautes températures, surdosage bitume, formulation

		inadaptée, excès liant d'accrochage
<b>Urbaines</b>	Fissuration périphérique des regards	Perte matériaux adjacents, gel-dégel, tassement différentiel, impacts dynamiques
	Coupes et tranchées	Défaut étanchéité joints, compactage insuffisant remblai, perte support latéral
	Dénivellation regards/puisards	Gel-dégel, tassement différentiel, érosion, compactage insuffisant

## 2.9 Méthodes d'Auscultation et de Diagnostic des Chaussées

L'évaluation de l'état des chaussées repose sur une combinaison de mesures techniques et d'inspections visuelles, permettant d'analyser la structure, d'identifier les causes des désordres et de proposer des solutions adaptées.

- **Auscultation visuelle** : C'est l'élément fondamental du diagnostic. Elle permet à l'ingénieur d'établir les premières hypothèses sur l'origine des dégradations et de repérer les points singuliers (Batata, n.d.). Le relevé peut être direct (ingénieur parcourant la route à pied) ou photographique automatique (Batata, n.d.). Les dégradations sont localisées par points kilométriques (PK) et leur étendue et gravité sont évaluées.



Figure 42: Auscultation visuelle [5].

- **Mesure de déflexion (F/HWD) :** Largement utilisée, cette méthode non destructive mesure les déflexions verticales à la surface de la chaussée sous un chargement dynamique. Le déflectomètre simule le passage d'un poids lourd et enregistre la déformée induite, fournissant des données essentielles sur la capacité portante. Cet essai permet de déterminer le comportement et la capacité structurale de la chaussée, d'estimer sa durée de vie résiduelle et de définir les épaisseurs de renforcement nécessaires [26].



Figure 43: Appareil de Mesure de déflexion (F/HWD) [5].

- **Investigations géotechniques :** Elles sont menées pour connaître la nature et les caractéristiques des matériaux constituant le corps de chaussée existant et le sol support. Cela inclut des sondages sous chaussée pour relever les épaisseurs des couches non traitées et déterminer la nature des matériaux prélevés. Des essais en laboratoire, tels que l'essai Proctor (pour le compactage), l'essai CBR (pour la résistance des sols), et les

limites d'Atterberg (pour la plasticité des sols), sont également réalisés.

## 2.10 Programmes de modélisation (ex: ELMOD6, ALIZE III) :

Ces logiciels sont utilisés pour l'analyse structurelle et le calcul du dimensionnement des couches de renforcement.

- **ELMOD6** permet d'effectuer une analyse structurelle complète et de calculer le dimensionnement des couches de renforcement à partir des bassins de déflexions mesurées par le système HWD, en tenant compte du trafic et de l'environnement climatique. Il évalue les modules des différentes couches, les dommages causés par les charges et l'épaisseur de recouvrement nécessaire.
- **ALIZE III**, développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), permet de calculer les contraintes et les déformations aux différentes interfaces d'une structure multicouche (jusqu'à six couches) basée sur l'hypothèse de Burmister. Il utilise une charge unitaire correspondant à un essieu standard de 13 tonnes pour vérifier la fiabilité des solutions de renforcement proposées [27].

Les outils de diagnostic ne sont pas seulement des instruments d'évaluation de l'état actuel, mais aussi des outils prédictifs. En mesurant les déflexions et les propriétés des matériaux, les ingénieurs peuvent estimer la durée de vie résiduelle des chaussées et calculer avec précision les épaisseurs de renforcement nécessaires pour répondre aux exigences futures du trafic. Cette approche axée sur les données est essentielle pour concevoir des solutions de renforcement rentables et structurellement saines, passant d'une logique de réparation réactive à une gestion proactive des actifs routier

## 2.11 Conclusion

Ce chapitre a dressé un panorama complet des différentes pathologies affectant les chaussées souples. Tout au long de leur cycle de vie, ces infrastructures subissent des sollicitations multiples : les charges dynamiques du trafic routier, les contraintes thermiques (dilatation/retrait) et les agressions climatiques, particulièrement marquées en période hivernale [28]. Dès leur mise en service, les chaussées entament un processus inévitable de dégradation. Ces phénomènes se manifestent par une diversité de désordres superficiels et structuraux, des mécanismes de détérioration communs aux chaussées revêtues et non revêtues [28], et une progression pathologique influencée par la qualité des matériaux et les conditions d'exploitation [29]. Cette analyse des pathologies constitue un préalable essentiel pour élaborer des diagnostics précis, choisir des techniques de réparation adaptées et optimiser les stratégies de maintenance préventive [30].

## Chapitre 3 : Introduction aux matériaux composites

### 3.1 Introduction

Les matériaux composites représentent une avancée significative dans le domaine de l'ingénierie des matériaux, offrant des performances supérieures à celles de leurs constituants individuels. Leur application en génie civil, notamment pour le renforcement des chaussées, est en pleine expansion. Ce chapitre se propose d'explorer en profondeur les aspects fondamentaux des matériaux composites, depuis leur définition et leurs composants essentiels jusqu'à leurs propriétés mécaniques, thermiques et hygroscopiques. Nous examinerons également leurs avantages et limites, ainsi que les procédés de mise en œuvre spécifiques pour les chaussées, incluant la modélisation du comportement des structures renforcées et l'analyse paramétrique des contraintes d'interface, éléments cruciaux pour une conception et une application optimale.

### 3.2 Définition et Composants Essentiels des Matériaux Composites

Un matériau composite est le résultat d'une association synergique d'au moins deux composants distincts et non miscibles, mais présentant une forte capacité d'adhésion [31]. Cette combinaison confère au matériau final des propriétés améliorées que chaque élément seul ne possède pas.

Les composants clés d'un matériau composite sont :

- **Les renforts** :Généralement sous forme de fibres (continues ou discontinues), ils constituent l'ossature du composite et sont responsables de l'essentiel de sa résistance mécanique [32]. Leur orientation est optimisée en fonction des sollicitations attendues.
- **La matrice** :Cette phase liante enrobe les renforts. Son rôle est de transmettre les efforts aux fibres, de protéger ces dernières contre les agressions externes (chimiques, humidité, abrasion) et d'éviter les ruptures brutales du matériau.

• Une caractéristique majeure des composites structuraux est leur anisotropie prononcée, ce qui signifie que leurs propriétés mécaniques varient significativement selon la direction considérée [33].

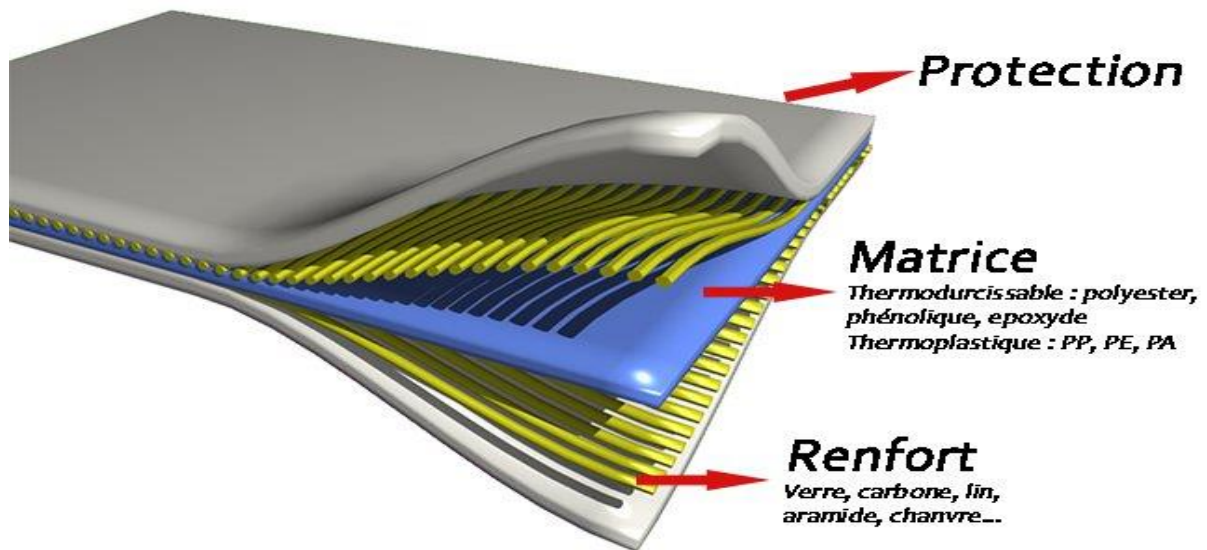


Figure 44: Composants Essentiels des Matériaux Composites [10].

### 3.3 Classification et Caractéristiques des Matrices et des Renforts (Fibres)

Les matériaux composites peuvent être classés selon la forme ou la nature de leurs constituants, offrant une grande diversité de propriétés adaptées à des applications spécifiques.

#### 3.3.1 Classification par forme des constituants :

- **Composites à particules** :Le renfort est sous forme de particules isotropes. Ils sont utilisés pour améliorer la rigidité, la résistance à l'abrasion et réduire le retrait, souvent comme charges économiques.
- **Composites à fibres** :Le renfort est fibreux (continues ou courtes). Leurs propriétés mécaniques peuvent être modulées par l'orientation des fibres, permettant de créer des matériaux allant de l'anisotrope au

quasi-isotrope.

### 3.3.2 Classification par nature des constituants :

- **Matrice organique** :Généralement des résines, associées à des fibres de verre, de carbone ou de Kevlar. Leur plage de température d'utilisation est généralement inférieure à 300°C.
- **Matrice métallique** :Composée de métaux légers comme l'aluminium (Al), le magnésium (Mg) ou le titane (Ti), renforcés par des fibres de bore ou de carbure de silicium (SiC). Ils sont adaptés aux températures plus élevées, jusqu'à 600°C.
- **Matrice minérale (céramique)** :Composée de céramiques, renforcée par des particules de carbure ou de nitrure. Ces composites peuvent supporter des températures très élevées, jusqu'à 1000°C.

### 3.3.4 Matrices :

- ❖ **Matrices organiques** :Ce sont les plus couramment utilisées en génie civil.
- **Thermodurcissables** :Elles subissent un durcissement irréversible lors de leur mise en œuvre. Les résines polyester, époxy et phénoliques en sont des exemples. Elles offrent une excellente rigidité (module élastique de 30 à 100 MPa). Les polyesters sont économiques mais présentent un retrait important. Les époxydes, bien que plus coûteuses et avec un temps de polymérisation plus long, offrent les meilleures performances mécaniques (résistance à la traction, compression, flexion) et une excellente résistance aux agressions environnementales et chimiques, avec un faible retrait au moulage et une bonne tenue aux températures élevées. Les phénoliques sont plus flexibles et résistantes à la fissuration que les polyesters, avec une bonne résistance à la corrosion et aux chocs.

- **Thermoplastiques** :Elles sont recyclables par fusion. Bien que plus faciles à mettre en œuvre, elles sont moins utilisées en génie civil en raison de leur faible résistance chimique, de leur retrait élevé et de leur faible ténacité.
- ❖ **Matrices métalliques** :Utilisées pour des applications à haute température.
- ❖ **Renforts (Fibres)** :Le type, la taille, la longueur et la direction des fibres influencent significativement les propriétés du composite (densité, rigidité, résistance, coût, conductivité) [34].
- **Fibres de verre** :Les plus utilisées en raison de leur faible coût, de leur résistance élevée à la traction, de leur résistance chimique et de leur bonne tenue aux températures élevées. Leurs inconvénients incluent un module de traction relativement faible, une densité élevée, une susceptibilité à l'usure et une fragilité. Les types courants sont les fibres de verre E (les plus utilisées en génie civil pour leur non-conductivité électrique), S (développées pour l'aérospatiale, haute résistance à la traction) et C (haute résistance à l'abrasion).
- **Fibres de carbone** :Très performantes, avec une faible densité, une résistance élevée à la traction et à la compression, et une bonne tenue aux températures élevées (jusqu'à 1500°C). Leurs principaux inconvénients sont leur coût élevé et leur faible résistance aux chocs.
- **Fibres d'aramides (Kevlar)** :Développées par Dupont, elles ont la plus faible densité et le rapport résistance/poids le plus élevé. Elles offrent une bonne résistance à l'abrasion, aux chocs, à la fatigue, à la température et aux agressions chimiques, mais une faible résistance à la compression et au cisaillement.
- **Fibres métalliques (acier)** :Les plus utilisées en génie civil parmi les fibres métalliques. Leur performance dépend de l'adhésion interfaciale avec la matrice, améliorée par la variation de la surface, du diamètre et de

la longueur.

- **Fibres de polypropylène** : Polymère cristallisable, offrant une bonne résistance à la traction (jusqu'à 800 MPa) et une grande déformabilité. Utilisées dans les panneaux décoratifs, revêtements de façade, canalisations.
- **Fibres d'amiante** : Historiquement utilisées comme renforts, elles offrent une excellente tenue au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé, ainsi qu'une résistance chimique. Cependant, leur caractère cancérigène a fortement limité leur usage.
- **Fibres céramiques** : Utilisées dans des applications à très haute température (500°C à 2000°C), comme les moteurs d'avions.
- **Fibres de cellulose** : Obtenues à partir du bois, utilisées comme additif au ciment et renfort pour des matrices organiques ou cimentaires, améliorant la résistance mécanique par le freinage des fissures.
- **Fibres de bore** : Fibres à haut module, insensibles à l'oxydation à haute température.
- **Fibres de polyester** : Filées, non tissées et continues, utilisées notamment dans la toiture.

### 3.3.5 Formes de renforts :

Les fibres peuvent se présenter sous forme linéique, surfacique (tissus simples, mats) ou multidirectionnelle.

Tableau IV: Classification et Propriétés Clés des Constituants des Composites [4].

Composant	Sous-type	Propriétés Clés	Avantages	Inconvénients
<b>Matrice</b>	Polyester (thermodurcissable)	Module: 30-90 MPa, Densité: 1.1-1.3 g/cm <sup>3</sup> , Résistance chimique (Mesegmine& Houari, 2022)	Économique, bonne rigidité, facilité de mise en œuvre, durcissement rapide (Mesegmine& Houari, 2022)	Retrait important (Mesegmine& Houari, 2022)
	Époxyde (thermodurcissable)	Module: 30-100 MPa, Densité: 1.1-1.3 g/cm <sup>3</sup> , Résistance traction: 90 MPa, Allongement: 8.0 % (Mesegmine& Houari, 2022)	Meilleures propriétés mécaniques et environnementales, faible retrait (Mesegmine& Houari, 2022)	Coût élevé, temps de polymérisation long (Mesegmine& Houari, 2022)
	Phénolique (thermodurcissable)	Module: 2.5 GPa, Résistance traction: 40 MPa, Allongement: 1.8 % (Mesegmine& Houari, 2022)	Plus flexible que polyester, meilleure résistance à la fissuration, corrosion, chocs (Mesegmine& Houari, 2022)	Coût élevé (Mesegmine& Houari, 2022)

## 3.4 Propriétés Mécaniques, Thermiques et Hygroscopiques des Composites

Les propriétés des matériaux composites sont intrinsèquement liées à la nature, la qualité, l'orientation des fibres, le type de matrice et la fraction volumique des fibres.

### 3.4.1 Propriétés mécaniques :

- ❖ **Fraction volumique** : La proportion relative de fibres et de matrice est un facteur déterminant pour les propriétés du composite.
- ❖ **Densité** : La densité d'un composite est la somme des masses de ses constituants divisée par leur volume total, incluant les vides.
- ❖ **Modules de Young et coefficients de Poisson** : Les composites présentent un comportement anisotrope. Pour les composites à fibres continues unidirectionnelles, leur comportement est caractérisé par cinq constantes indépendantes : le module d'élasticité longitudinal (EL), le module d'élasticité transversal (ET), le module de cisaillement dans le plan (G12) et deux coefficients de Poisson ( $\nu_{12}$  et  $\nu_{23}$ ). Des formules spécifiques permettent de dériver ces modules et coefficients à partir des propriétés des fibres et de la matrice.

### 3.4.2 Propriétés thermiques :

La dilatation thermique d'un composite est caractérisée par des coefficients de dilatation thermique longitudinal ( $\alpha_L$ ) et transversal ( $\alpha_T$ ).

### 3.4.3 Propriétés hygroscopiques :

Ces propriétés, qui décrivent les changements dimensionnels dus à l'absorption d'humidité, sont caractérisées par des coefficients hygroscopiques longitudinal ( $\beta_L$ ) et transversal ( $\beta_T$ ) [35].

Tableau V: Propriétés Mécaniques Typiques des Composites Couramment Utilisés en Génie Civil [4].

Composite Unidirectionnel	Contenu en Fibres (% par poids)	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Module d'Élasticité (GPa)	Résistance à la Traction (MPa)
<b>Fibres de verre / polyester (GFRP laminé)</b>	50-80	1600-2000	20-55	400-1800 (Mesegmine& Houari, 2022)
<b>Carbone / époxy (CFRP laminé)</b>	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250 (Mesegmine& Houari, 2022)
<b>Aramide / époxy (FRP laminé)</b>	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800 (Mesegmine& Houari, 2022)

### 3.5 Avantages et Limites des Composites dans le Génie Civil

Les matériaux composites offrent des atouts considérables, mais aussi des contraintes, qui doivent être pris en compte pour leur application optimale en génie civil.

#### 3.5.1 Avantages :

- **Légèreté** :Ils permettent un gain de masse significatif, ce qui est crucial pour réduire les charges mortes sur les structures.
- **Résistance mécanique élevée** :Ils présentent une excellente résistance à la fatigue et à la corrosion.
- **Formabilité complexe** :Leur capacité de moulage permet de réaliser des formes complexes.

- **Résistance chimique** :Ils sont insensibles à de nombreux produits chimiques.
- **Durabilité** :Leur excellente résistance à la corrosion et aux substances chimiques leur confère des durées de vie plus longues que les matériaux traditionnels.
- **Facilité d'application** :Leur mise en œuvre est relativement simple, peu dérangement pour les usagers et moins exigeante en main-d'œuvre.
- **Haute résistance à la traction** :Les systèmes à base de PRF sont légers, possèdent une haute résistance à la traction et sont faciles à installer, ce qui facilite la manutention et accélère les travaux de réparation ou de construction.

### 3.5.2 Inconvénients :

- **Sensibilité** :Ils peuvent être sensibles à l'eau et aux variations de température.
- **Coût** :Leur coût initial, tant pour les matériaux que pour la mise en œuvre, est généralement élevé [36].
- **Tenue aux impacts** :Leur résistance aux impacts peut être modérée.
- **Concentration de contraintes** :Les stratifiés peuvent présenter des concentrations de contraintes.
- **Résistance spécifique** :Les fibres de carbone, malgré leurs performances, ont une résistance aux chocs et à l'abrasion limitée. Les fibres d'aramide ont une faible résistance à la compression et au cisaillement.

- **Concentrations d'interface** :L'inconvénient majeur des matériaux composites est la création de concentrations de contraintes au niveau des interfaces entre les couches, en raison d'un changement brutal des propriétés mécaniques d'une couche à l'autre.

Le choix d'un composite n'est pas arbitraire ; il s'agit d'une décision de conception stratégique basée sur le mécanisme de dégradation spécifique et la performance souhaitée de la chaussée. La capacité d'adapter les propriétés des composites, notamment leur anisotropie, permet un renforcement directionnel ciblé. Bien que le coût initial des composites soit élevé, les bénéfices à long terme, tels que la durée de vie prolongée, la réduction des retards pour les usagers et la diminution des émissions de CO<sub>2</sub>, peuvent justifier l'investissement, en particulier pour les routes à fort trafic. Une analyse du coût du cycle de vie est donc essentielle pour évaluer la viabilité économique des composites dans le renforcement des chaussées. De plus, la matrice du composite est plus qu'un simple liant ; elle joue un rôle essentiel dans l'activation des performances des fibres, notamment en assurant une bonne adhésion et en protégeant les fibres des agressions environnementales. Une attention particulière à la qualité de la matrice et de l'interface fibre-matrice est donc cruciale pour la performance optimale du composite [37].

### 3.6 Procédés de Mise en Œuvre des Composites pour les Chaussées

Dès le début des années 1990, les matériaux composites ont rapidement supplanté les plaques en acier pour le renforcement des structures, malgré leur coût initial plus élevé. Cette transition est due à la simplicité relative de leur application, à la faible perturbation pour les usagers et à des exigences moindres en main-d'œuvre.

### 3.6.1 Notion de multicouches composites pour la réparation des ouvrages :

La conception d'un système multicouche composite vise plusieurs objectifs : assainir l'état de surface du support en béton (élimination des fissures, ragréage), éliminer les défauts géométriques pour minimiser le délaminage, appliquer une couche de primaire pour améliorer l'adhérence, appliquer un nombre suffisant de couches composites pour assurer la stabilité, et ajouter une couche de finition pour la protection (corrosion, UV).

### 3.6.2 Différentes techniques de mise en œuvre :

- **Moulage au sac** :Ce procédé permet d'obtenir des propriétés mécaniques élevées à court terme en maîtrisant les conditions de mise en œuvre. Après préparation de la surface en béton, des couches de tissus pré-imprégnés sont découpées et appliquées, puis un bonnet chauffant est placé et une enveloppe étanche est fixée à une pompe à vide pour appliquer une pression externe pendant la polymérisation.
- **Stratification directe (ou moulage au contact)** :Utilise des matériaux qui polymérisent à température ambiante. Le procédé implique le traitement de surface du béton, l'application d'une couche primaire, la découpe et la dépose des tissus, l'imprégnation et le débullage des renforts, et l'application d'une couche de protection. C'est une méthode simple mais dont la qualité dépend de l'opérateur.
- **Collage de plaques composites** :Cette méthode consiste à coller des panneaux composites (généralement en carbone ou en verre, fabriqués par pultrusion) à la surface de l'élément avec une colle époxy (Mesegmine& Houari, 2022). Ces panneaux peuvent être pré-étirés. Cette technique est similaire au collage de plaques d'acier, mais elle utilise des matériaux

beaucoup plus légers (1/5 de la densité de l'acier), nécessite une pression de liaison limitée et élimine les problèmes de corrosion.

- **Enroulement filamentaire** : Cette technique crée une enveloppe en enroulant des renforts continus saturés de résine autour de l'élément à renforcer. Elle est couramment utilisée pour les colonnes circulaires.
- **Produits pultrudés** : Ce procédé permet l'usinage en continu de profilés pleins ou creux de formes complexes. Des renforts (verre, carbone, aramide) imprégnés de résine sont tirés à travers un moule chauffé où la polymérisation s'effectue. Les produits finaux se présentent sous forme de bandes ou de barres rigides [38].

### 3.7 Conclusion

Ce chapitre a introduit les principes fondamentaux des matériaux composites, mettant en lumière leur hétérogénéité contrôlée et leur adaptabilité mécanique. Nous avons détaillé la composition des composites, en distinguant les renforts (fibres) et les matrices, et en explorant leurs classifications et propriétés spécifiques. Les avantages des composites, tels que leur légèreté, leur haute résistance mécanique, leur durabilité et leur résistance à la corrosion, ont été mis en parallèle avec leurs limites, notamment leur sensibilité à l'eau et à la température, leur coût initial élevé et les concentrations de contraintes aux interfaces. Les différentes techniques de mise en œuvre, du moulage au sac au collage de plaques et à l'utilisation de géogrilles, ont été présentées, soulignant leur rôle croissant dans le renforcement des chaussées. Enfin, la modélisation des contraintes d'interface a révélé l'importance cruciale de l'optimisation des propriétés des matériaux et des géométries pour garantir la performance et la durabilité des structures renforcées. Cette compréhension approfondie des composites et de leurs.

## Chapitre 4 : Technique de renforcement des routes par les matériaux composites

## 4.1 Introduction

Ce chapitre se penche sur l'application pratique des matériaux composites pour le renforcement des chaussées, en s'appuyant sur les connaissances fondamentales établies précédemment. Il détaillera les diverses techniques de mise en œuvre, de la stratification directe à l'utilisation de géogrilles avancées, et explorera les aspects cruciaux de la modélisation du comportement des structures renforcées, en particulier les contraintes d'interface. Une étude de cas spécifique, le projet PN30 Mascara en Algérie, sera présentée pour illustrer la pertinence et le potentiel de ces matériaux dans un contexte réel. Enfin, ce chapitre examinera les normes, directives et recherches actuelles, soulignant le paysage évolutif et les besoins futurs dans le domaine du renforcement routier par composites.

## 4.2 Procédés de Mise en Œuvre des Composites pour les Chaussées

Dès le début des années 1990, les matériaux composites ont rapidement supplanté les plaques en acier pour le renforcement des structures, malgré leur coût initial plus élevé. Cette transition est due à la simplicité relative de leur application, à la faible perturbation pour les usagers et à des exigences moindres en main-d'œuvre.

### 4.2.1 Notion de multicouches composites pour la réparation des ouvrages :

La conception d'un système multicouche composite vise plusieurs objectifs : assainir l'état de surface du support en béton (élimination des fissures, ragréage), éliminer les défauts géométriques pour minimiser le délaminage, appliquer une couche de primaire pour améliorer l'adhérence, appliquer un nombre suffisant de couches composites pour assurer la stabilité, et ajouter une couche de finition pour la protection (corrosion, UV) [39].

### 4.3 Différentes techniques de mise en œuvre :

#### 4.3.1 Moulage au sac :

Ce procédé permet d'obtenir des propriétés mécaniques élevées à court terme en maîtrisant les conditions de mise en œuvre. Après préparation de la surface en béton, des couches de tissus pré-imprégnés sont découpées et appliquées, puis un bonnet chauffant est placé et une enveloppe étanche est fixée à une pompe à vide pour appliquer une pression externe pendant la polymérisation.

#### 4.3.2 Stratification directe (ou moulage au contact) :

Utilise des matériaux qui polymérisent à température ambiante. Le procédé implique le traitement de surface du béton, l'application d'une couche primaire, la découpe et la dépose des tissus, l'imprégnation et le débullage des renforts, et l'application d'une couche de protection. C'est une méthode simple mais dont la qualité dépend de l'opérateur.

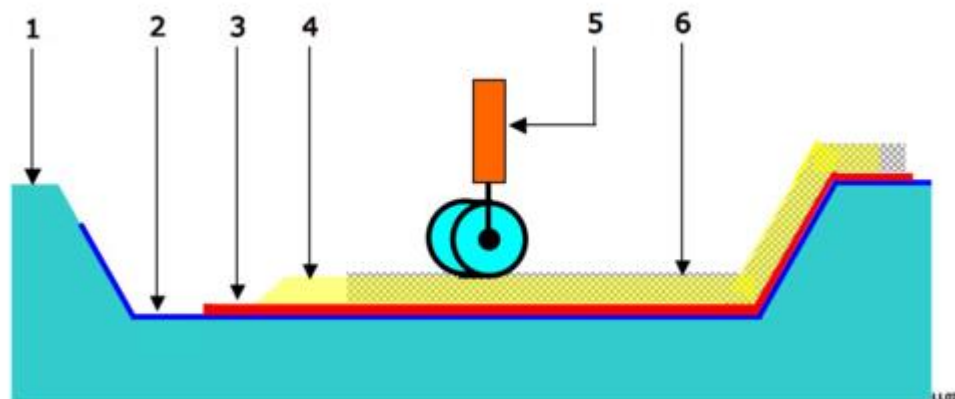


Figure 45: Moulage par projection simultanée [10].

Schéma simplifié du procédé de moulage au contact : 1 moule, 2 agents de démoulage, 3 gelcoat, 4 résines avec fibres, 5 rouleaux ébulleur, 6 matériau composite.

### 4.3.3 Collage de plaques composites :

Cette méthode consiste à coller des panneaux composites (généralement en carbone ou en verre, fabriqués par pultrusion) à la surface de l'élément avec une colle époxy. Ces panneaux peuvent être pré-étirés. Cette technique est similaire au collage de plaques d'acier, mais elle utilise des matériaux beaucoup plus légers (1/5 de la densité de l'acier), nécessite une pression de liaison limitée et élimine les problèmes de corrosion.

### 4.3.4 Enroulement filamentaire :

Cette technique crée une enveloppe en enroulant des renforts continus saturés de résine autour de l'élément à renforcer. Elle est couramment utilisée pour les colonnes circulaires.

### 4.3.5 Produits pultrudés :

Ce procédé permet l'usinage en continu de profilés pleins ou creux de formes complexes. Des renforts (verre, carbone, aramide) imprégnés de résine sont tirés à travers un moule chauffé où la polymérisation s'effectue. Les produits finaux se présentent sous forme de bandes ou de barres rigides.

## 4.4 Géogrilles pour le renforcement des chaussées :

Les géogrilles, fabriquées à partir de fils en fibres de verre ou de carbone et souvent pré-enrobées de bitume, sont des armatures conçues pour renforcer les chaussées en enrobés bitumineux [40]. Elles améliorent la résistance à la fatigue et à la fissuration, ainsi que la durabilité des chaussées, notamment en limitant la remontée des fissures (thermiques, de fatigue, de joints de construction). Les géogrilles en carbone peuvent augmenter la capacité portante de la chaussée, permettant même de réduire l'épaisseur de l'enrobé bitumineux de 3 à 4 cm.

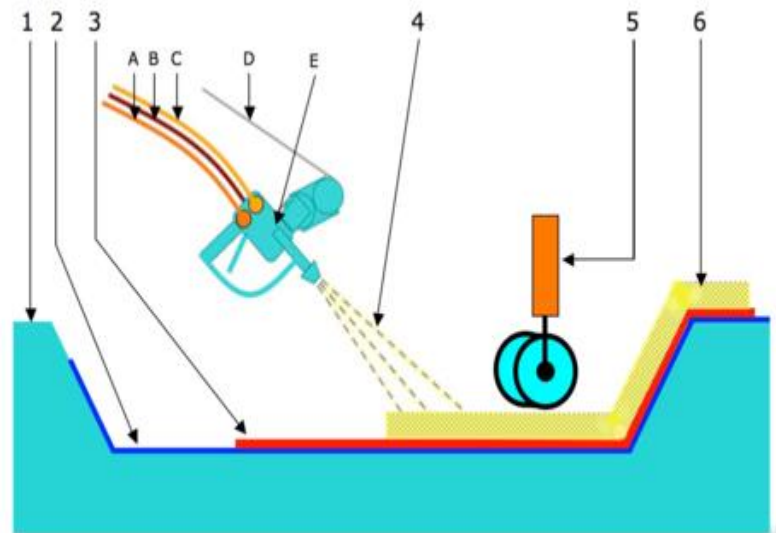


Figure 46: schéma Moulage par projection simultanée [10].

Schéma simplifié du procédé de moulage par projection simultanée : 1 moule, 2 agent de démoulage, 3 gelcoat, 4 pulvérisation des fibres et de la résine, 5 rouleau ébulleur (élimination de l'air pour un bon mouillage de la fibre), 6 matériau composite. A alimentation du premier composant, B alimentation du second composant, C alimentation en air sous pression, D alimentation en fibres, E pistolet de découpe de fibres et de pulvérisation des deux composants et des fibres découpées.

#### 4.4.1 Applications :

Elles sont utilisées pour le renforcement structurel de chaussées sous-dimensionnées, la réparation des fissures (suppression des remontées de fissures), l'élargissement des chaussées (reprise des tassements différentiels), sur les tracés de fouilles et tranchées, le renforcement des points durs, et dans les nouvelles constructions (routes, aéroports, parkings).

#### 4.4.2 Installation :

Le processus implique la préparation de la surface (fraisage, nettoyage), l'application d'un enduit d'accrochage ou d'une membrane SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), l'application mécanique ou manuelle de la géogridde (avec recouvrement des bords), un gravillonnage pour faciliter la circulation et assurer la liaison, et enfin la pose de la couche de roulement en enrobé bitumineux.

#### 4.4.3 Bénéfices :

Les géogriddes offrent un système de réhabilitation durable et économique, augmentent la sécurité et le confort des usagers, prolongent significativement la durée de vie de la chaussée, réduisent considérablement les coûts d'entretien, permettent des économies de CO<sub>2</sub> de plus de 40 % et réduisent la congestion du trafic.

La transition des méthodes traditionnelles de renforcement (plaques d'acier, chemisage en béton) vers les matériaux composites est le reflet d'une évolution des priorités en ingénierie. Cette évolution s'oriente vers une approche plus nuancée, privilégiant les propriétés intrinsèques des matériaux (légèreté, résistance à la corrosion) et la facilité d'application, plutôt que la simple addition de masse structurelle. Les coûts initiaux plus élevés des composites sont compensés par une complexité de mise en œuvre réduite et des économies significatives sur la maintenance à long terme. Cette transformation économique favorise des solutions qui minimisent les coûts sociétaux et opérationnels tout au long du cycle de vie de l'infrastructure, rendant les composites de plus en plus attractifs.

### 4.5 Modélisation du Comportement des Structures Renforcées : Contraintes d'Interface

La technique de collage de plaques composites est employée pour augmenter

la résistance et la rigidité des structures en béton armé existantes. Pour optimiser ces renforcements et prévenir les défaillances, il est crucial de comprendre et de prédire les contraintes qui se développent à l'interface entre la structure d'origine et le matériau de renforcement.

- **Méthode théorique** : La modélisation du comportement d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque composite (ou en acier) collée par une couche adhésive repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices :
  - Tous les matériaux (poutre en béton, plaque, couche adhésive) ont un comportement linéaire élastique.
  - Les contraintes de cisaillement et les contraintes normales dans la couche adhésive sont considérées comme constantes sur toute son épaisseur.
  - La courbure de la poutre et de la plaque est identique.

#### 4.5.1 Contraintes d'interface de cisaillement ( $\tau(x)$ ) :

La contrainte de cisaillement dans la couche adhésive est dérivée en fonction du module de cisaillement de l'adhésif ( $G_a$ ) et des déplacements longitudinaux à la base de l'adhérent 1 (poutre) et au sommet de l'adhérent 2 (plaque). L'équilibre horizontal et les relations entre moments, forces axiales et forces de cisaillement sont utilisés pour établir une équation différentielle qui définit la contrainte de cisaillement d'interface.

#### 4.5.2 Contraintes d'interface normales ( $\sigma(x)$ ) :

La contrainte normale dans la couche adhésive est déterminée à partir des déplacements verticaux des deux adhérents et de leurs relations moment-courbure (Mesegmine & Houari, 2022). Une équation différentielle du quatrième

ordre est établi pour exprimer cette contrainte.

#### 4.5.3 Analyse des contraintes pour différents cas de charges :

Les solutions générales pour les contraintes d'interface de cisaillement et normales sont établies pour divers scénarios de chargement, tels qu'une charge uniformément répartie, une charge concentrée unique ou deux charges concentrées symétriques. Les constantes d'intégration sont déterminées en appliquant les conditions aux limites appropriées.

## Chapitre 05 : Cas d'études projet PN30 Mascara

## 5.1 Introduction :

La résolution des équations différentielles ou plus généralement des équations aux dérivées partielles occupe une place importante en ingénierie et en mathématiques appliquées. Chacune de ces disciplines apporte une contribution différente mais complémentaire à la compréhension et à la résolution de tels problèmes. Il existe plusieurs techniques permettant de résoudre les équations aux dérivées partielles. On pense par exemple aux méthodes de différences finies, des éléments finis, de volumes finis, aux méthodes spectrales, etc. La méthode des différences finies est une des plus anciennes méthodes de simulation numérique qui est encore utilisée pour certaines applications, comme la propagation d'ondes sismiques ou électromagnétiques ou la mécanique des fluides compressibles. Pour d'autres applications, comme la mécanique du solide ou celles des fluides incompressibles, on lui préfère souvent la méthode des éléments finis, ce chapitre donne une présentation de la méthode de différence finies, le logiciel de calcul, une présentation de notre cas d'étude ainsi qu'une modélisation numérique Ansys.

## 5.2 La méthode des éléments finis :

L'analyse aux finis (MEF) est une méthode de calcul utilisée dans les domaines scientifique et technique, avec les éléments finis, il est possible de calculer des problèmes complexes qui ne peuvent pas être résolus par d'autres méthodes, en effet, la méthode des éléments finis étant une analyse numérique consistant à résoudre des équations différentielles, il est possible de l'utiliser dans un domaine à analyser est subdivisé en un grand nombre de petits éléments finis avec une géométrie simple, qui peuvent être calculés avec les équations initiales connues, cette subdivision a donné le nom de la méthode numérique: méthode des éléments finis, en ingénierie, la méthode standard utilisée dans plusieurs secteurs (génie mécanique, génie civil, transport, aéronautique, espace, nucléaire, énergétique, militaire...). Les éléments finis est

aujourd'hui une méthode

### 5.2.1 Principes de La méthode des éléments finis :

La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds.

Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud.

La MEF utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques.

Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation[9].

### 5.2.2 Etapes de calcul par la méthode des éléments finis :

Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage)

Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire  $[k_e]$  reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux  $\{u_e\}$  et les forces  $\{f_e\}$  appliquées aux nœuds :  $[k_e] \{u_e\} = \{f_e\}$

Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global  $[K] \{U\} = \{F\}$  de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds

Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites

Résoudre le système  $[K] \{U\} = \{F\}$  et obtenir les déplacements  $\{U\}$  aux nœuds

Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées.

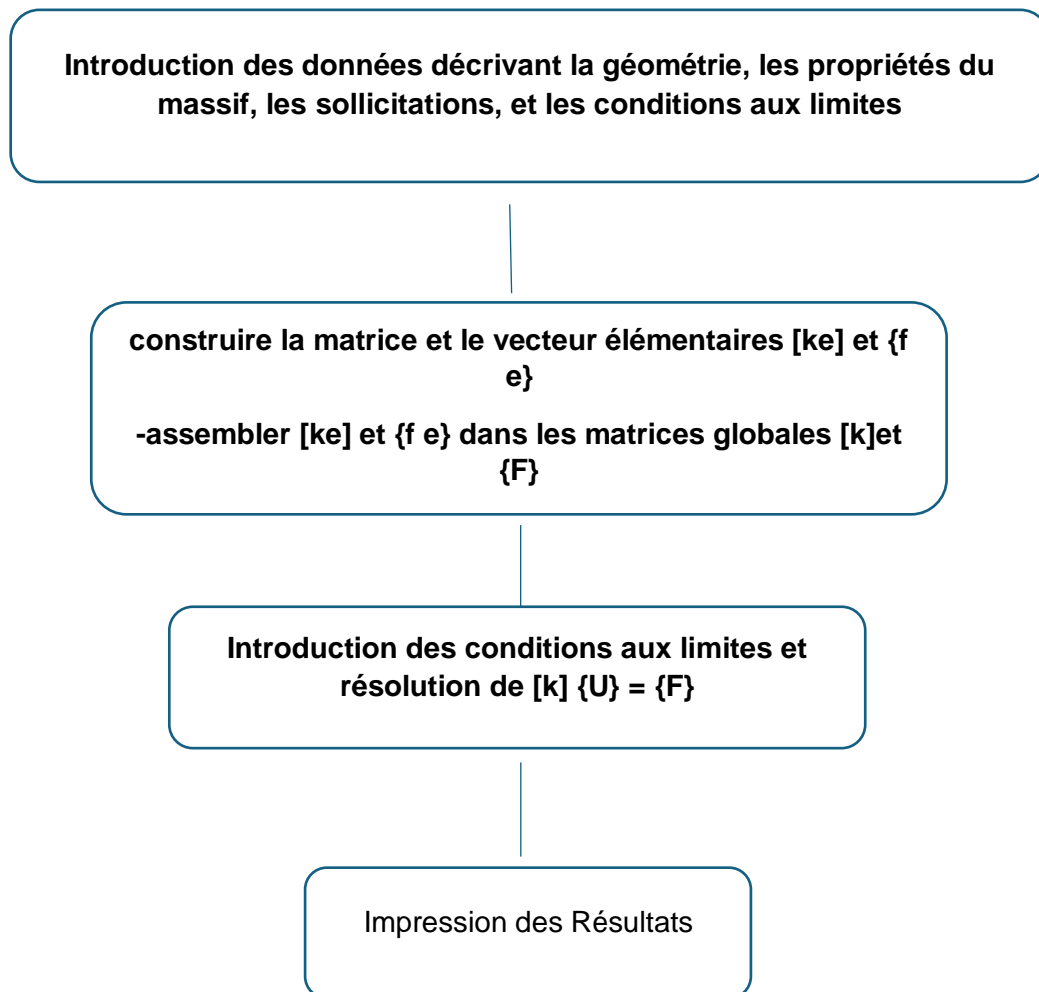


Figure 47 : Organigramme d'un programme de calcul par MEF

#### 5.4. Logiciel de Calcul Ansys :

ANSYS est un logiciel de simulation numérique leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le triels traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits[9].

Les utilisateurs ANSYS sont de domaines industriels différents telles que la

construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de consommation.

### 5.3 Cas d'études :

Dans notre cas nous allons utiliser le code ANSYS pour modéliser numériquement le comportement d'un corps de chaussée, en faisant une comparaison de l'état mécanique et physique d'une chaussée souple renforcée par géogridde dans deux position différentes (la première position entre le béton bitumineux et grave bitumineux et la deuxième position entre grave bitumineux et GNT) et la même chaussée sans renforcement.

Modélisation d'une chaussée souple sans renforcement.

Modélisation d'une chaussée souple renforcée par géogridde (la position de géogridde est entre la couche de base et la grave bitumineux)

Modélisation d'une chaussée souple renforcée par géogridde (la position de géogridde est entre la GB et GNT).



Figure 48 : Emplacement de la nappe gorille

1) Caractéristiques géométriques :

Longueur chaussée : 560m

Largeur chaussée : 14m

Largeur accotements: (1.5+1.5) m

Chargement: camions.

2) Caractéristiques géotechniques :

Corps de chaussée: Souple/asphalte

Couche de roulement : Béton bitumineux (épaisseur 6cm)

Couche de base: Arène-granitique (épaisseur 12m)

Couche de fondation: Arène-granitique (épaisseur 20cm)

Terrain naturel : Sable graveleux

CBR: 40

## 5.4 Propriétés mécaniques des matériaux :

*Tableau 6 : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés [5].*

<b>Matériau utilisé</b>	<b>Epaisseur (mm)</b>	<b>Module E (MPa)</b>	<b>Densité (KN/M<sup>3</sup>)</b>	<b>Module G (MPa)</b>	<b>Cohésion (KPa)</b>	<b>Coef. poisson</b>	<b>Angle frottement</b>
<b>Couche/Roulement BB (0/14)</b>	<b>60</b>	<b>5400</b>	<b>24</b>	<b>1176</b>	<b>/</b>	<b>0.35</b>	<b>-</b>
<b>Couche/Reprofilage GB (0/20)</b>	<b>120</b>	<b>260</b>	<b>24.7</b>	<b>-</b>	<b>20</b>	<b>0.38</b>	<b>43</b>
<b>Couche de fondation</b>	<b>200</b>	<b>120</b>	<b>18</b>	<b>-</b>	<b>20</b>	<b>0.48</b>	<b>44</b>
<b>Sol support</b>	<b>1000</b>	<b>50</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>8</b>	<b>0.40</b>	<b>36</b>
<b>Nappe géogridde (Fibres de verre)</b>	<b>1.5</b>	<b>629.3</b>	<b>11</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.30</b>	<b>-</b>

## 5.5 Modèle géométrique :

Le modèle est présenté dans les figures suivantes :

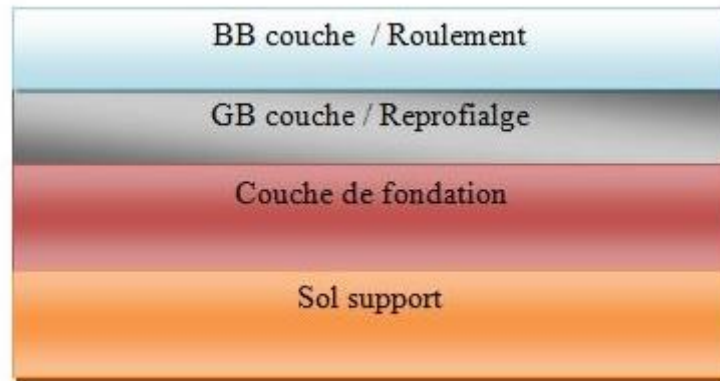


Figure 49 : Géométrie du modèle utilisé sans renforcement [11].

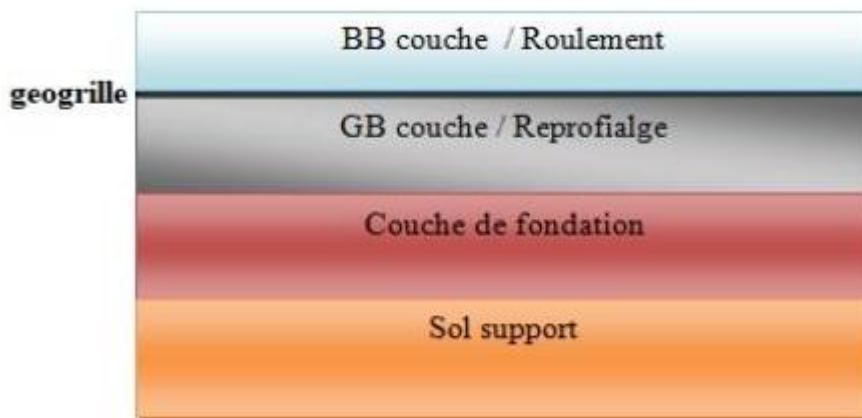


Figure 50 : Géométrie du modèle utilisé avec renforcement ( position N01) [11].

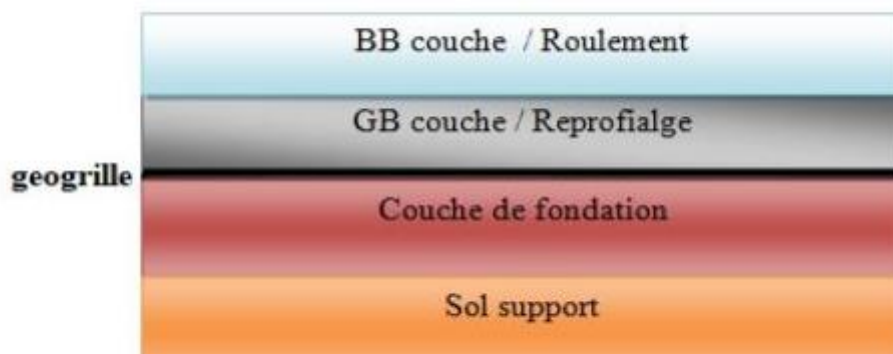


Figure 51 : Géométrie du modèle utilisé avec renforcement (position N02) [11].

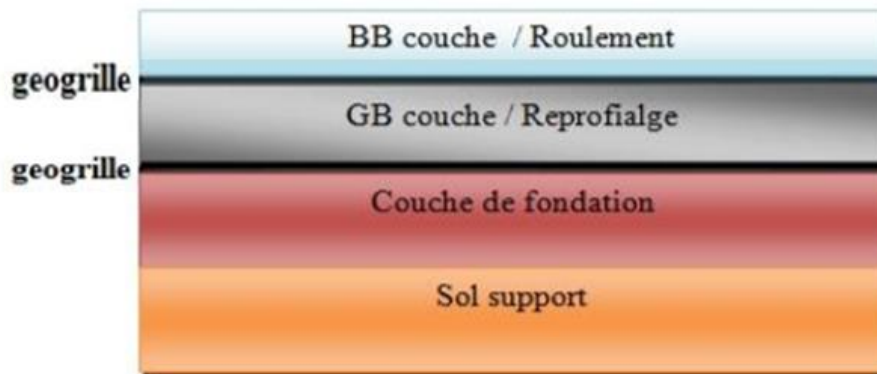


Figure 52 : Géométrie du modèle utilisé avec renforcement ( position N03) [11].

### 5.6 Etudes de l'influence de la pression de contact :

On a choisi un type de pneus un pneu super single la pression de gonflage est de 800 KPa (11.5 tonnes par essieu), température d'environnement de 22 degrés. La valeur de la charge appliquée à la surface est basée sur des mesures d'empreinte réelles réalisées au LAVOC (laboratoire des voies et circulation). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 7 : résultats obtenus**

Type de pneu	Pression reel		Modelisation donnee par (LAVOC)	
	Pression de gonflage (KPa)	Charge par essieu (tonnes)	Pression (KPa)	Surface (m*m)
Super single	800	11.5	800	0.32*0.22

Pour trouver plus d'utilités de l'intégration de n'importe quel type de géogrille dans la chaussée, il est nécessaire de rechercher à obtenir la position la plus favorable pour le renforcement, donc optimisé le positionnement du géogrille. Dans la pratique et au niveau national, le renforcement et la mise en œuvre des géogrilles sont fait soit entre la couche béton bitumineux et la grave bitumineux, soit entre la grave bitumineux et GNT.

En général la position du géogrille de renforcement dans le revêtement,

admette de limiter la propagation des fissures et réduise des efforts de traction dans l'asphalte par la-sollicitation de contrainte de traction dans les armatures. Tandis que dans les couches inférieures (non liées), les géogrilles permettent d'augmenter la résistance aux déformations élastiques, augmenter la capacité portante, réduire la sollicitation du sol sous-jacent, accroître la résistance à la déformation permanente du matériau et en fin de réduire les déformations.

Au sein de notre étude, on a étudié deux variantes de localisation de renforcement et en utilisant le même modèle précédent avec les mêmes matériaux et les mêmes dimensions. De cela, on varie l'emplacement de la nappe de géogrille dans les différentes couches de la chaussée[9].

Les résultats présentés dans cette partie portent sur les données numériques suivantes :

Déformation directionnelle de la chaussée sans et avec géogrille.

Déformation totale de la chaussée sans et avec géogrille

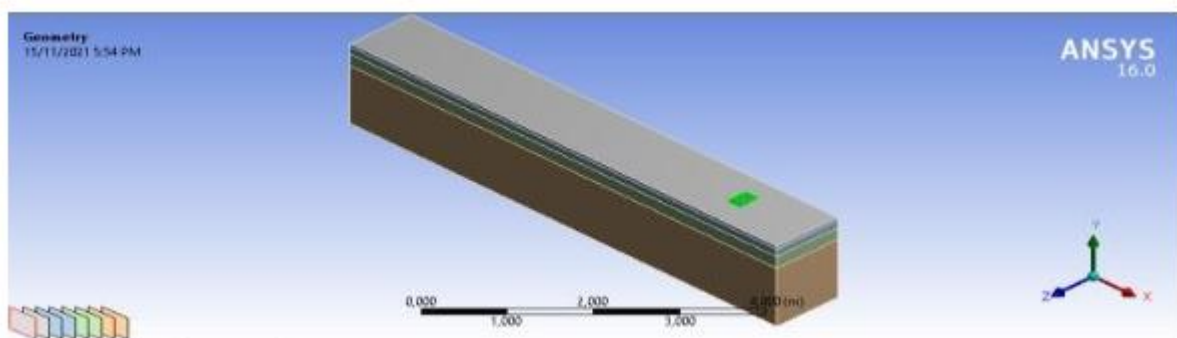
Contrainte de cisaillement de la chaussée sans et avec géogrille dans les 3 plans

Contrainte normale de la chaussée sans et avec géogrille dans les trois plans.

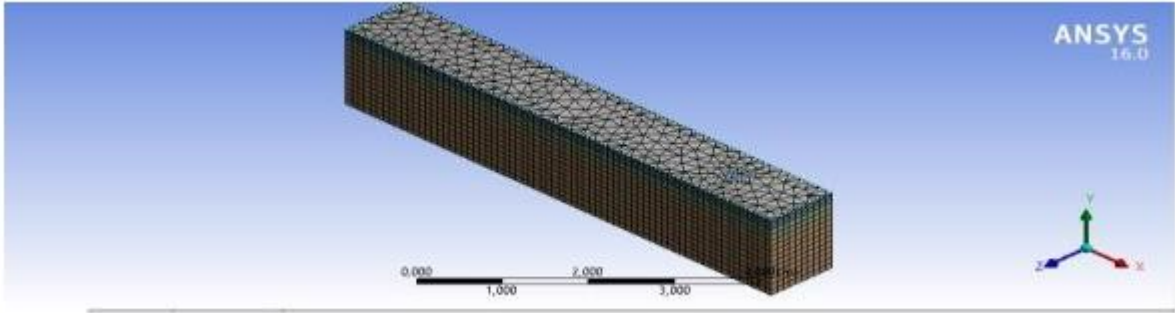
## 5.7 Les résultats obtenus :

### 5.7.1 Chaussée non renforcée[9] :

La géométrie :

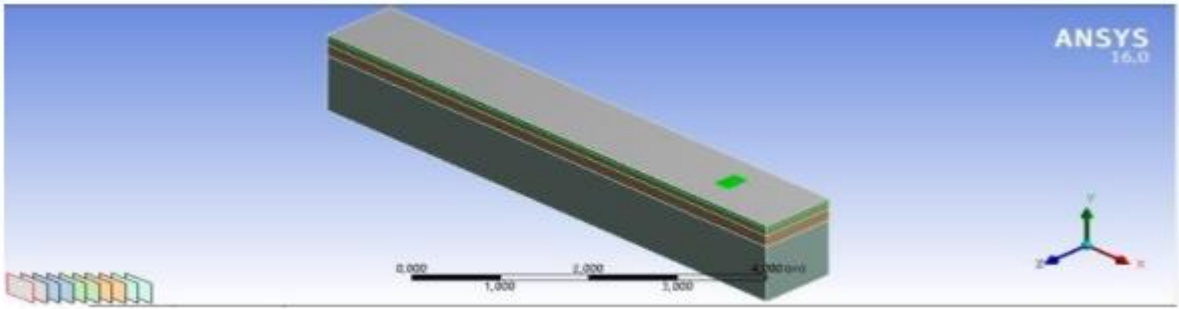


Le maillage :

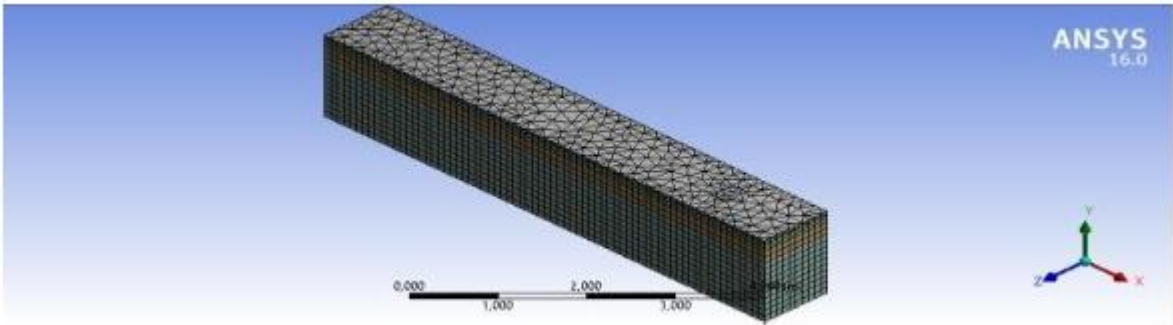


5.7.2 Chaussée renforcée (Position N01) [9]:

La géométrie :

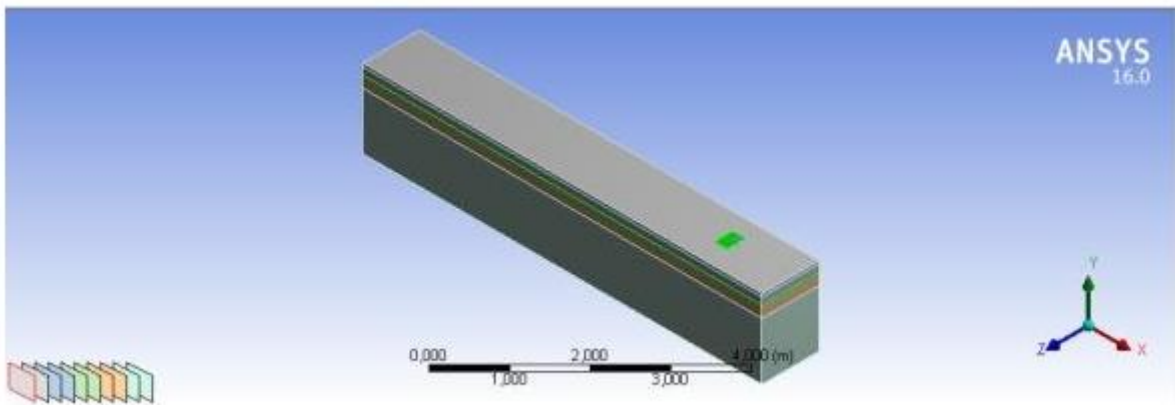


Le maillage :

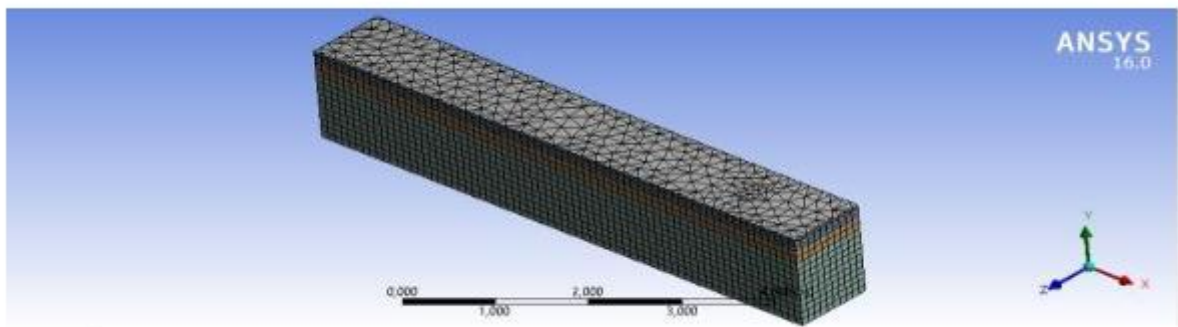


### 5.7.3 Chaussée renforcée (Position N02) [9] :

La géométrie :

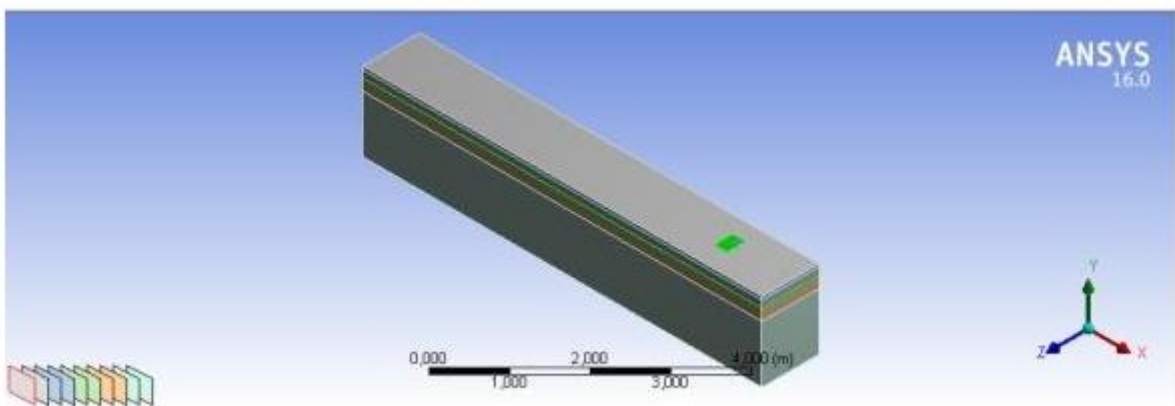


Le maillage :

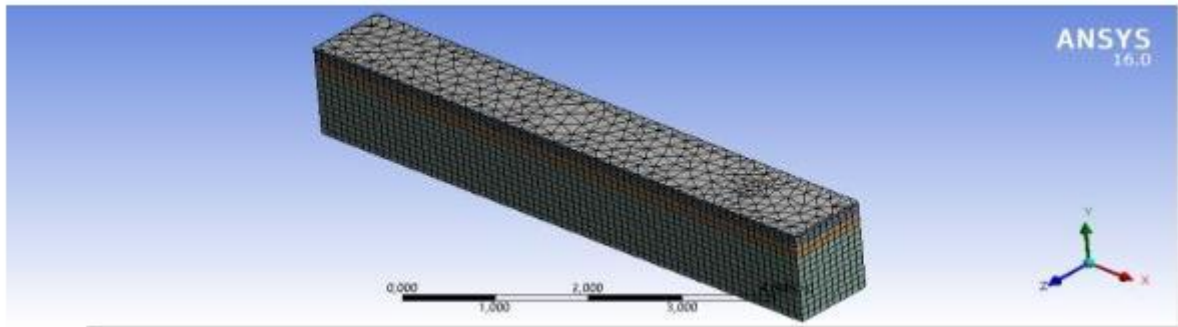


### 5.7.4 Chaussée renforcée (Position N03) :

La géométrie :



Le maillage :



### 5.7 Déformation Total (chaussée non renforcée) [9]:

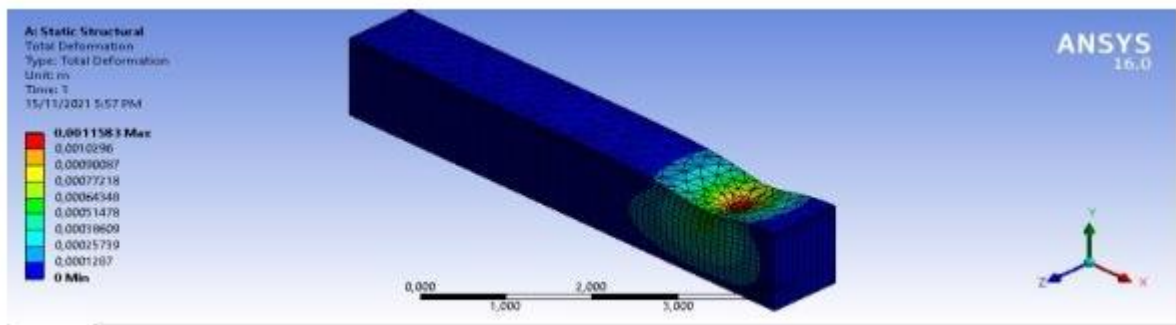


Figure 52 : Déformation Total d'une chaussée non renforcée

### 5.8 Déformation Directionnel :

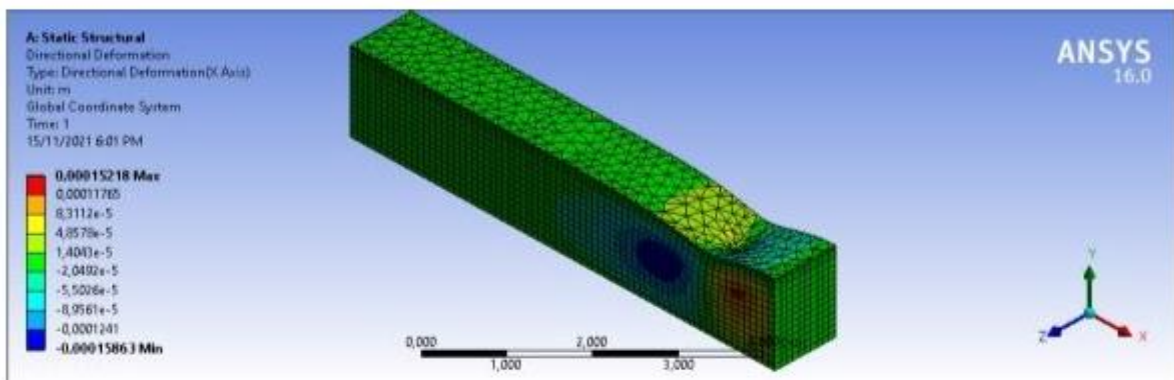


Figure 53 : Déformation Directionnelle d'une chaussée non renforcée (Axe X)

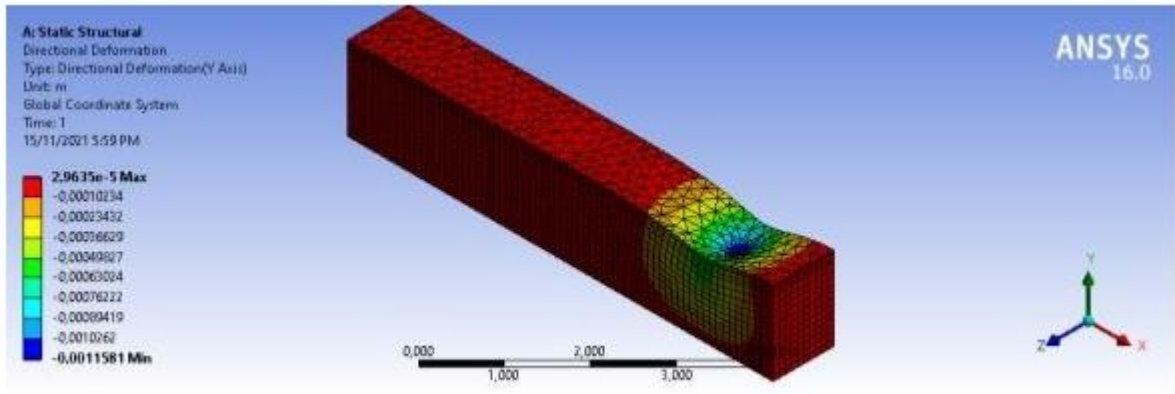


Figure 54 : Déformation Directionnelle d'une chaussée non renforcée (Axe Y)

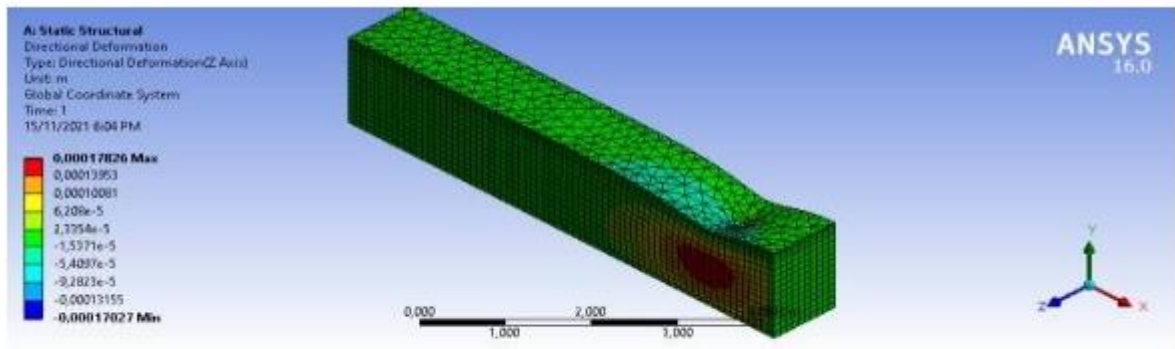


Figure 55 : Déformation Directionnelle d'une chaussée non renforcée (Axe Z)

## 5.9 Les contraintes normales :

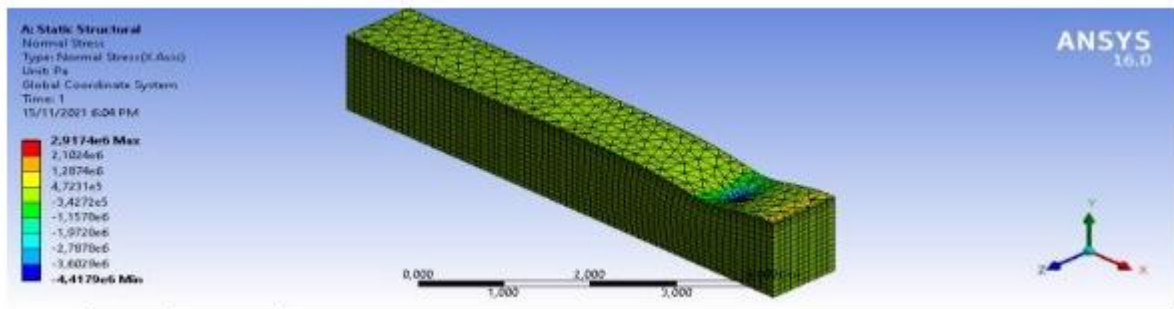


Figure 56 : Les contraintes normales d'une chaussée non renforcée (Axe X)

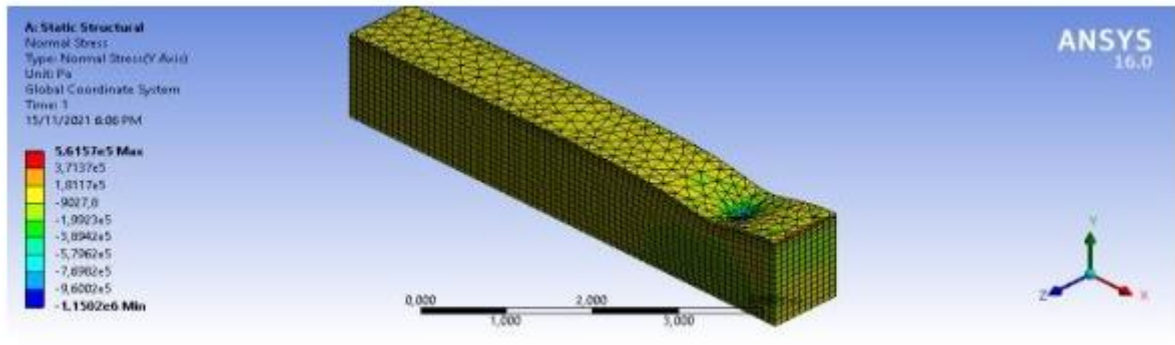


Figure 57 : Les contraintes normales d'une chaussée non renforcée (Axe Y)

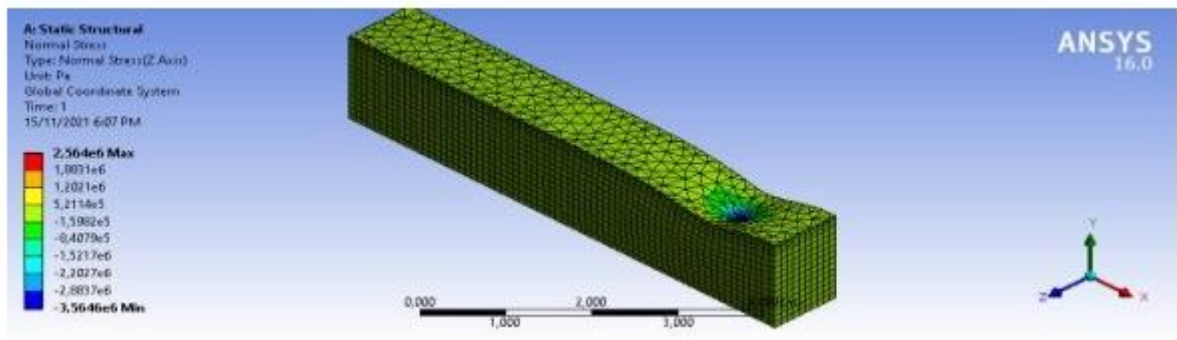


Figure 58 : Les contraintes normales d'une chaussée non renforcée (Axe Z)

### 5.10 Les contraintes de cisaillement :

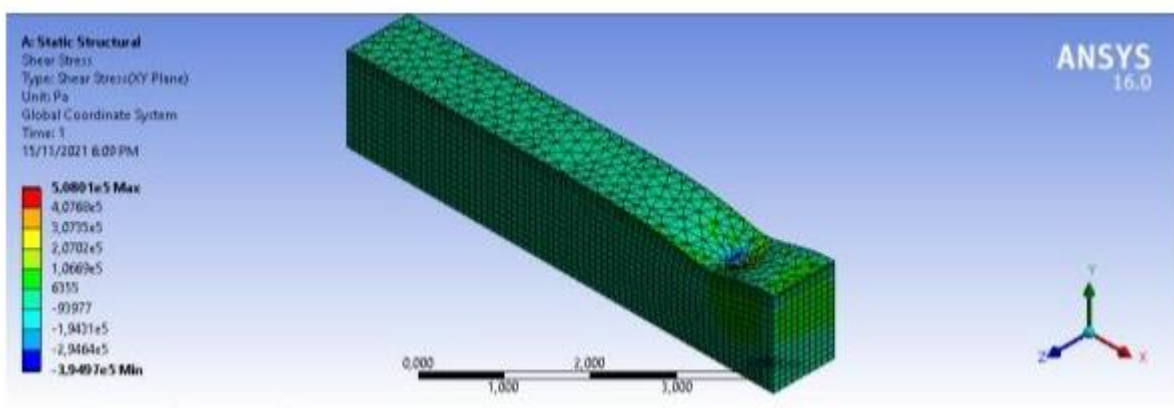


Figure 59 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée non renforcée (Plan XY)

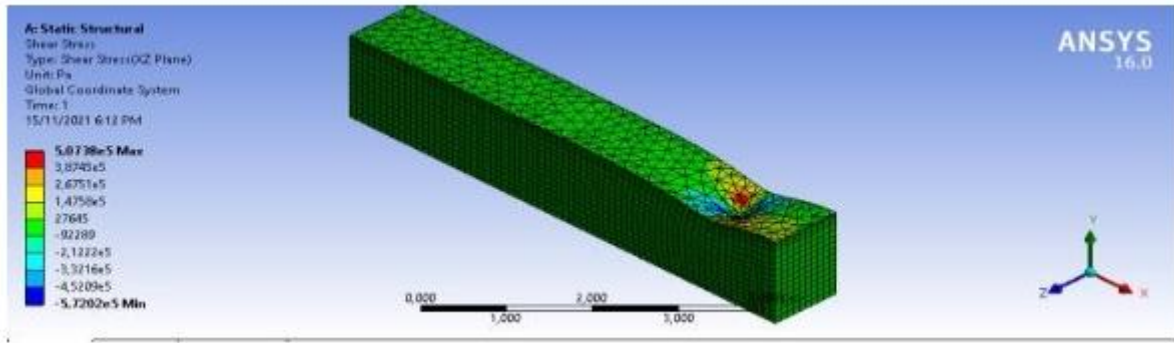


Figure 60 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée non renforcée (Plan XZ)

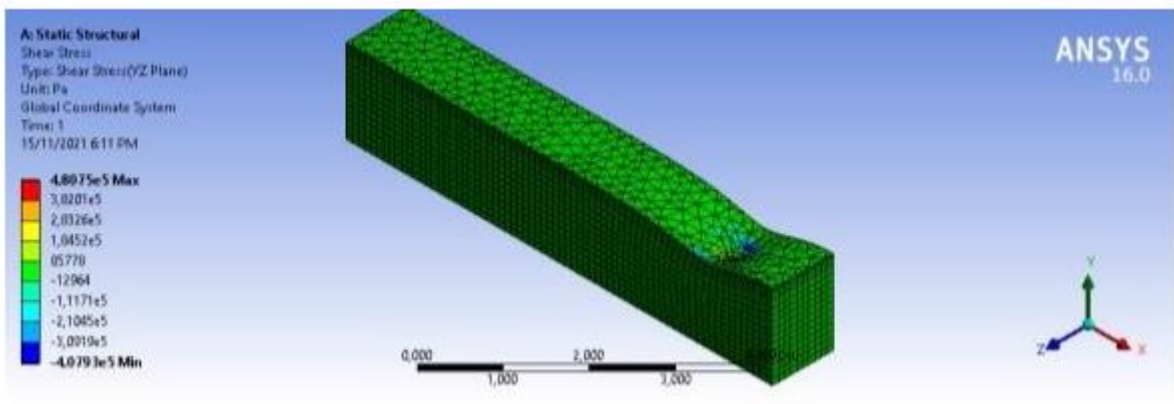


Figure 61 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée non renforcée (Plan YZ)

**Déformation Total (chaussée renforcée Position N01) BB/GB[9]:**

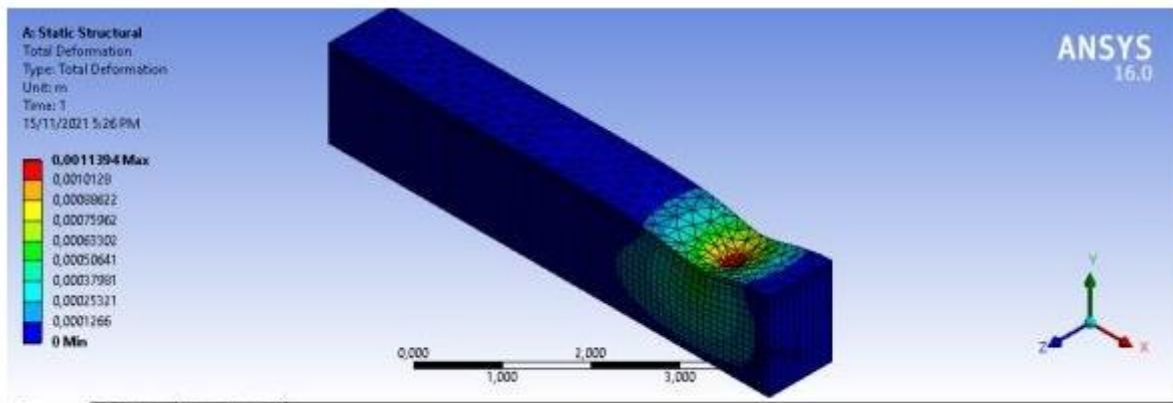


Figure 62 : Déformation Total d'une chaussée renforcée Position N01

### Déformation Directionnel :

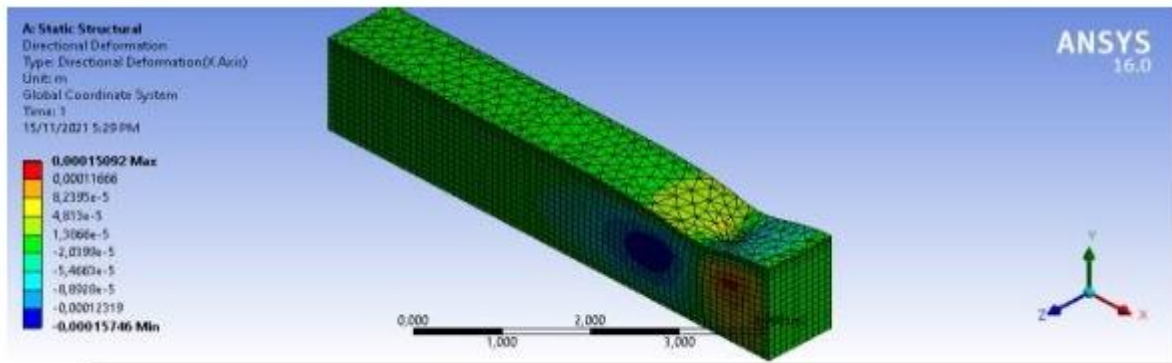


Figure 63 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe X)

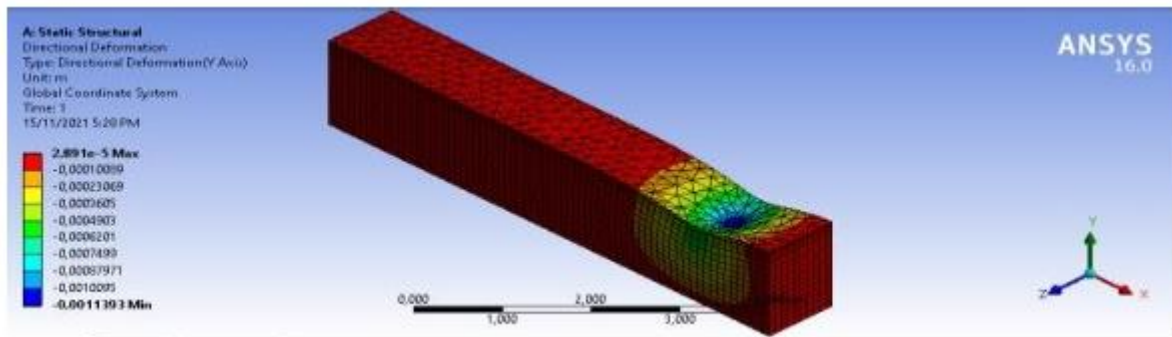


Figure 64 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe Y)

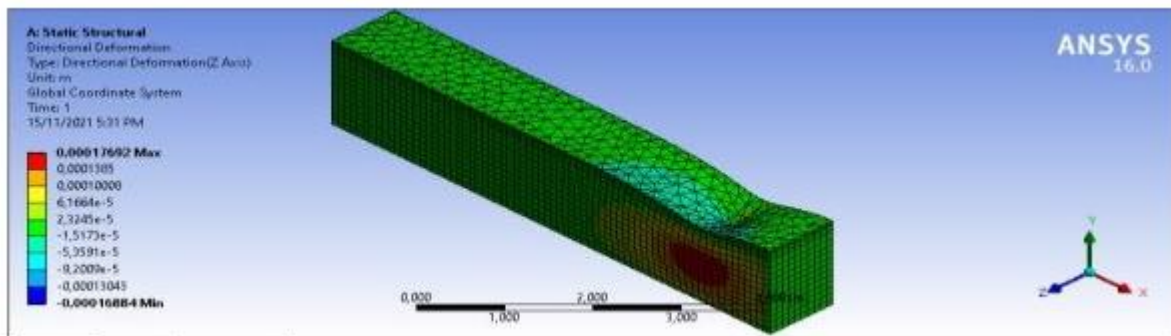


Figure 65 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe Z)

Les contraintes normales :

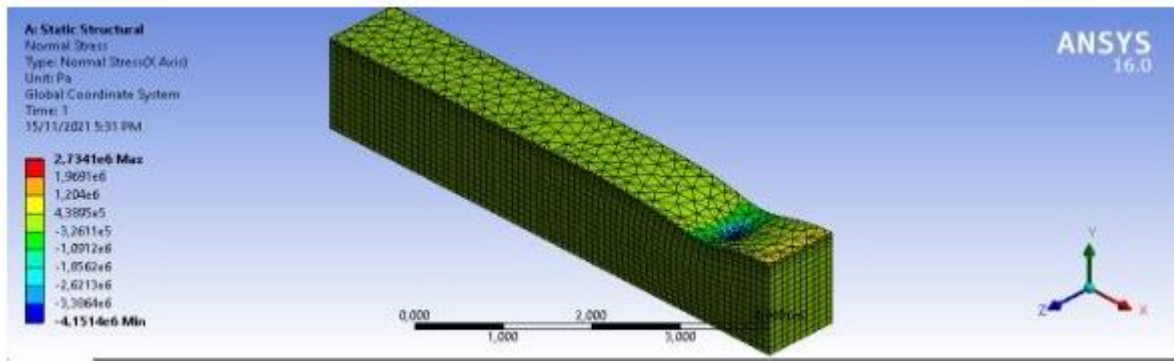


Figure 66 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe X)

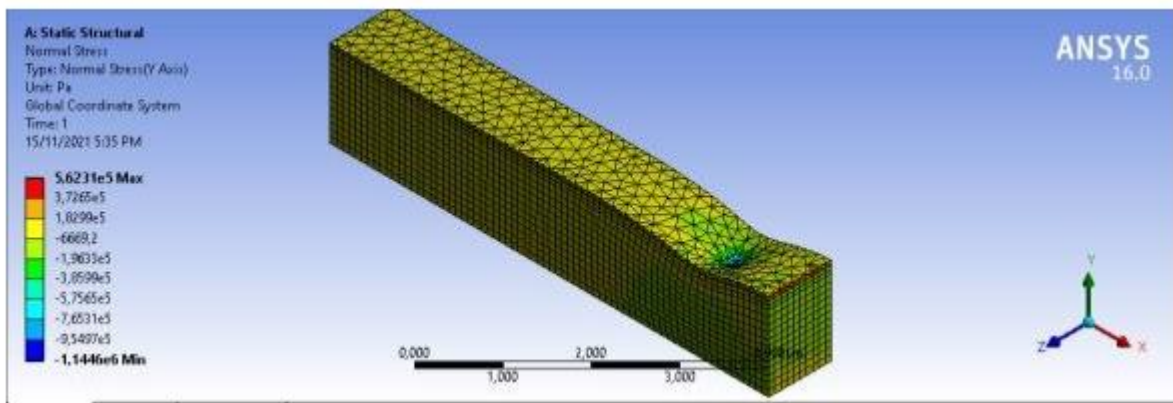


Figure 67 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe Y)

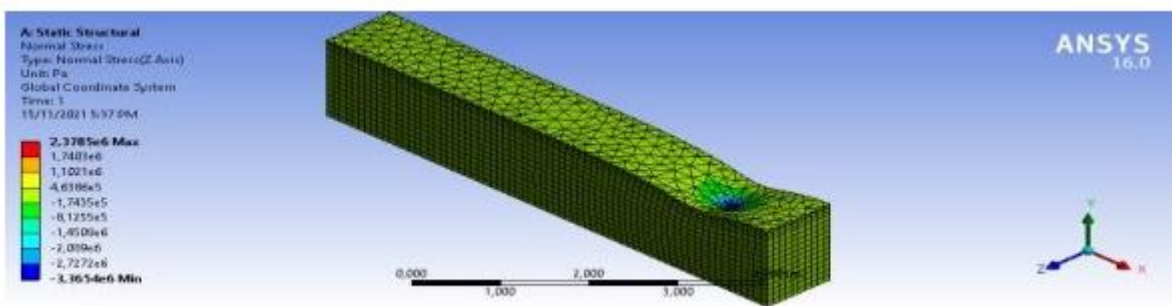


Figure 68 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N01 (Axe Z)

Les contraintes de cisaillement :

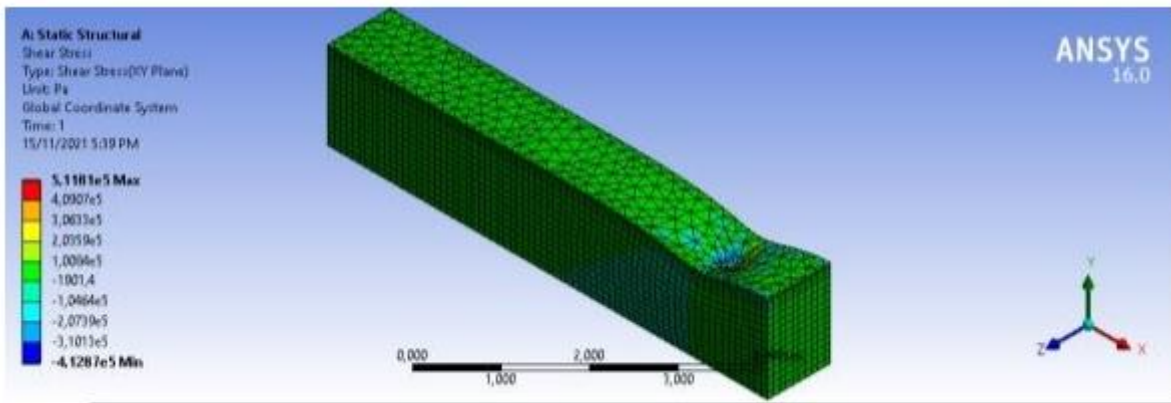


Figure 69 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N01 (Plan XY)

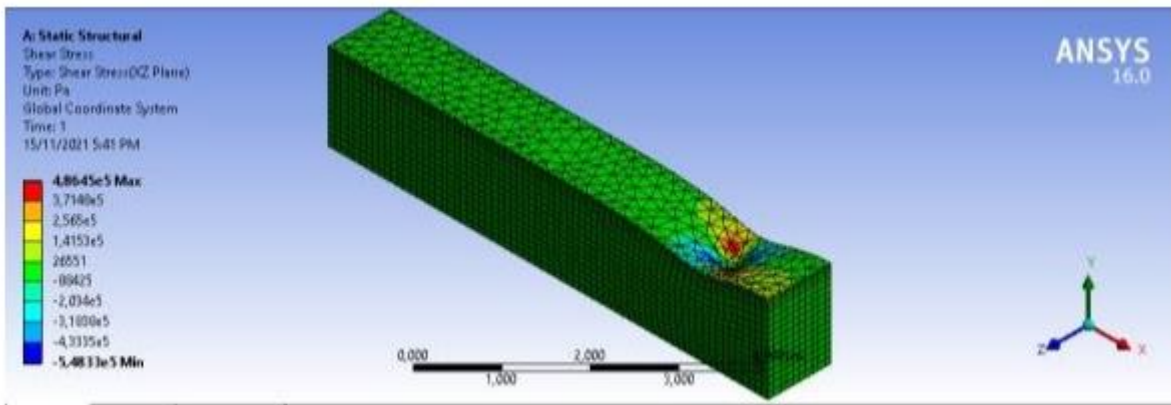


Figure 70 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N01 (Plan XZ)

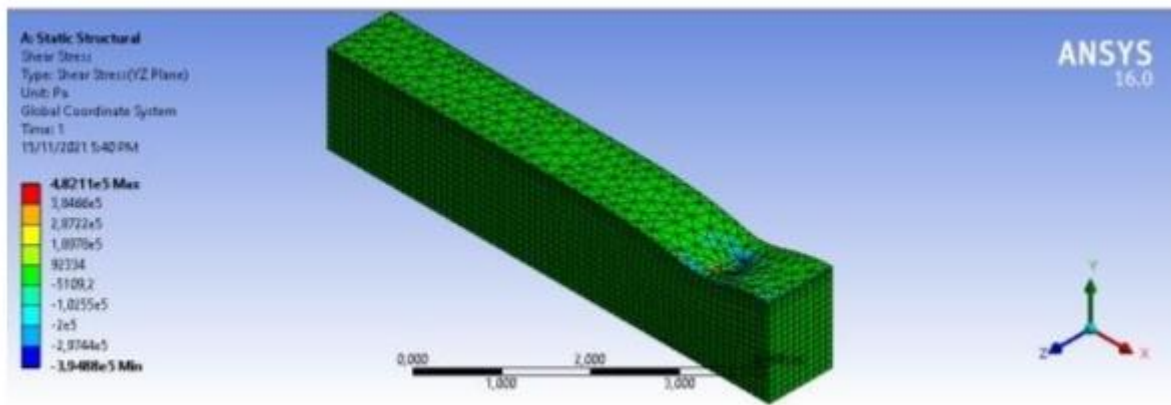


Figure 71 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N01 (Plan YZ)

Déformation Total (chaussée renforcée Position N02) GB/GNT [9]:

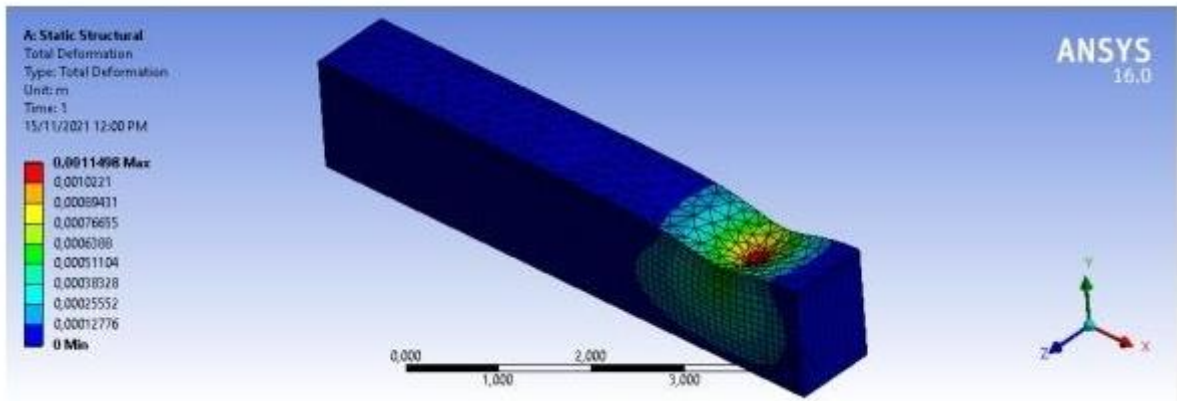


Figure 72 : Déformation Total d'une chaussée renforcée Position N02

Déformation Directionnel :

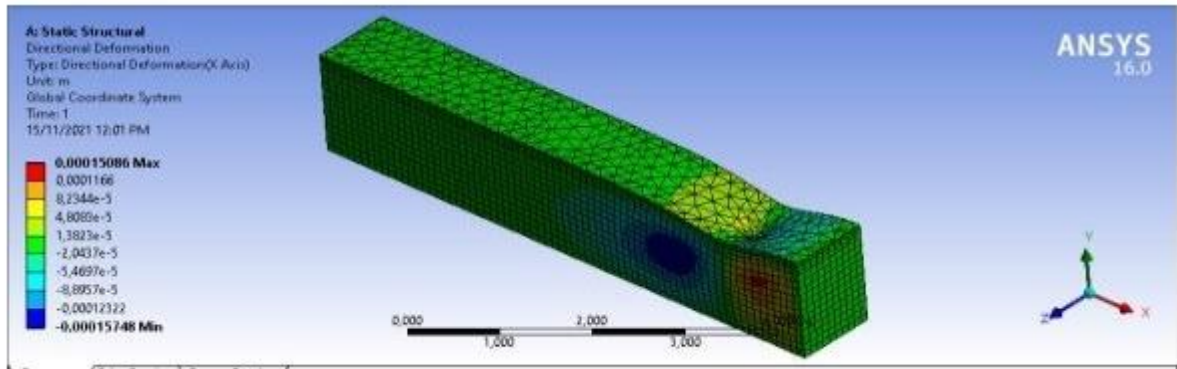


Figure 73 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe X)

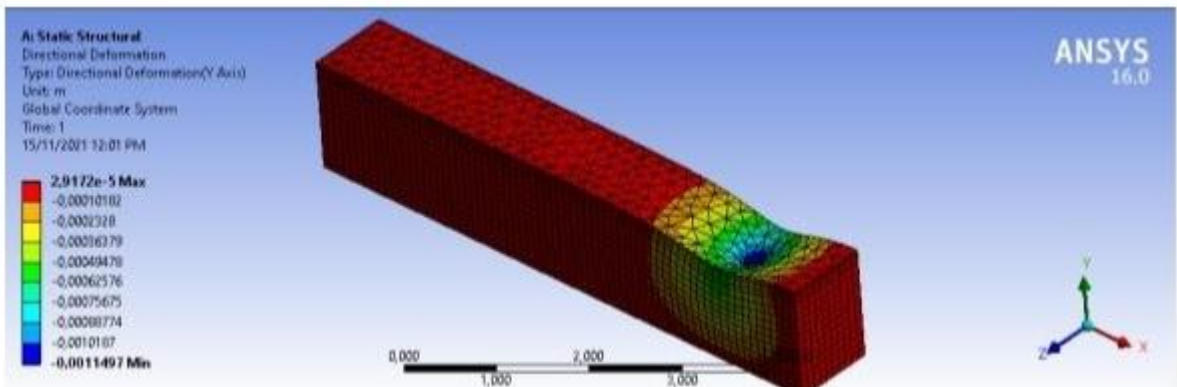


Figure 74 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe Y)

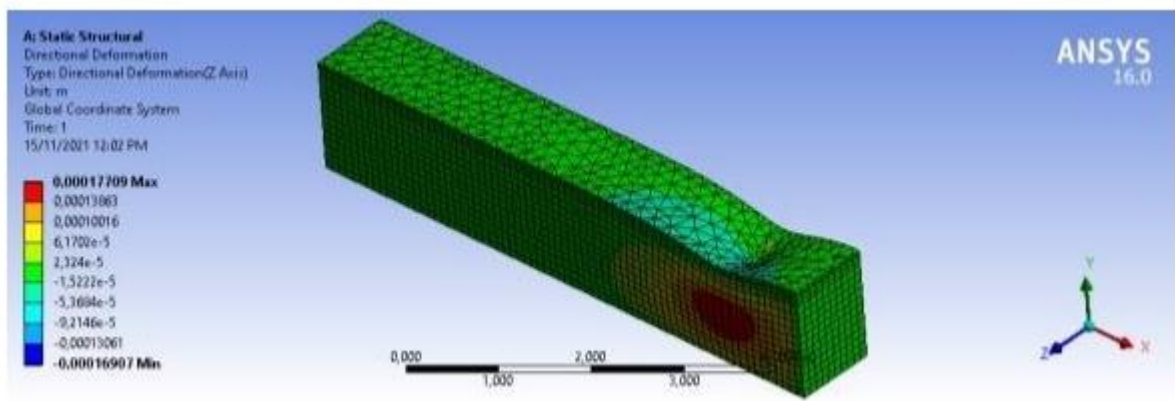


Figure 75 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe Z)

Les contraintes normales :

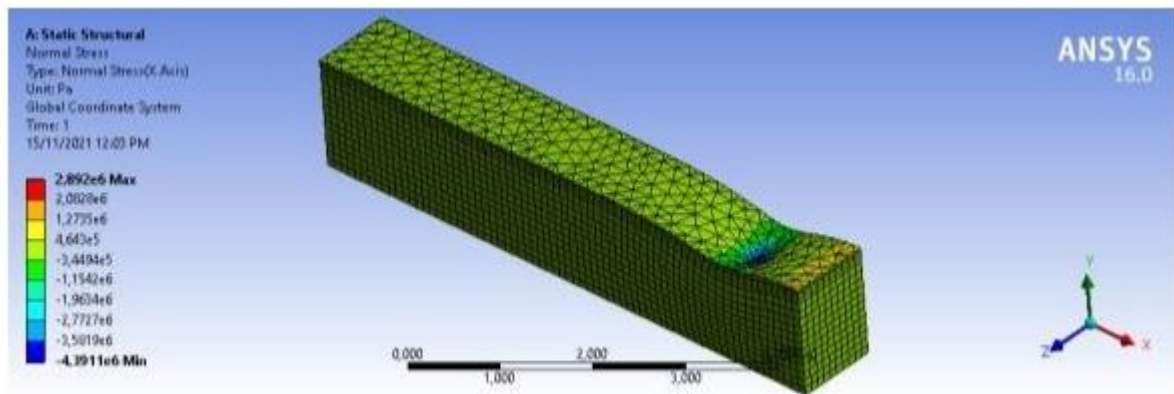


Figure 76 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe X)

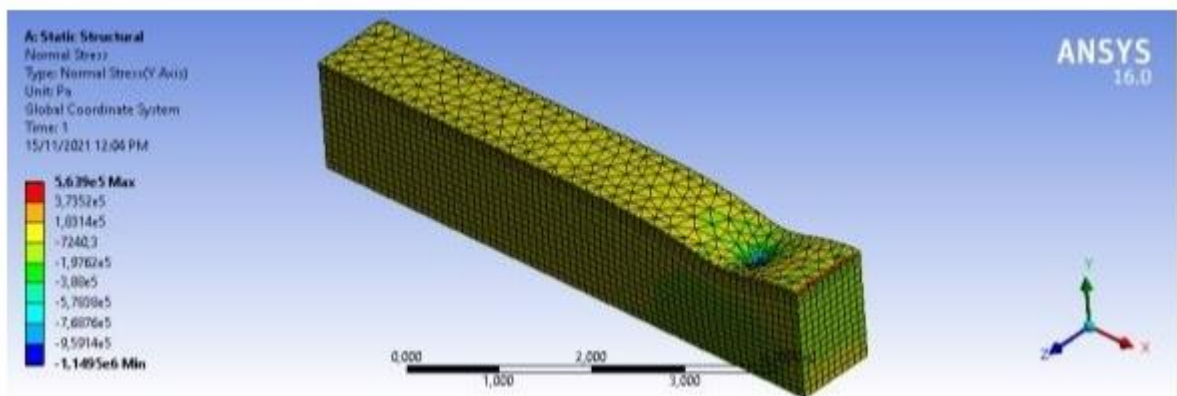


Figure 77 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe Y)

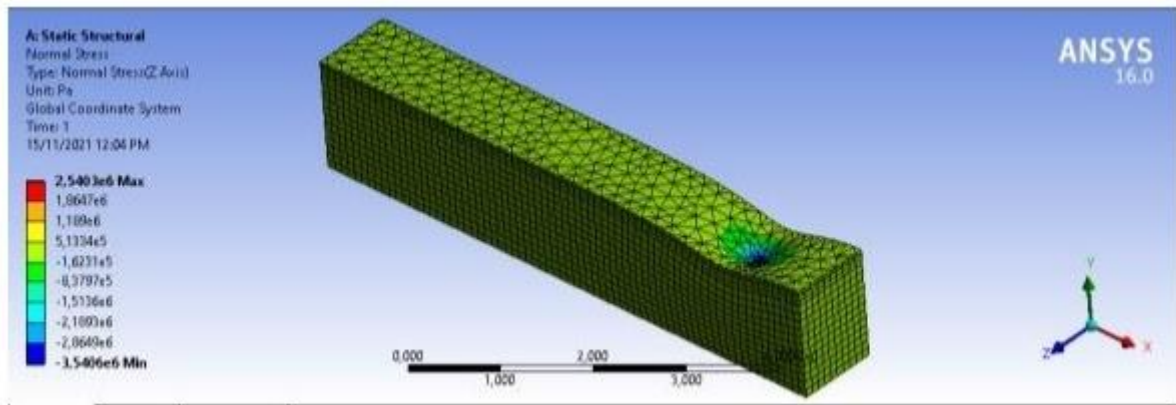


Figure 78 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N02 (Axe Z)

Les contraintes de cisaillement :

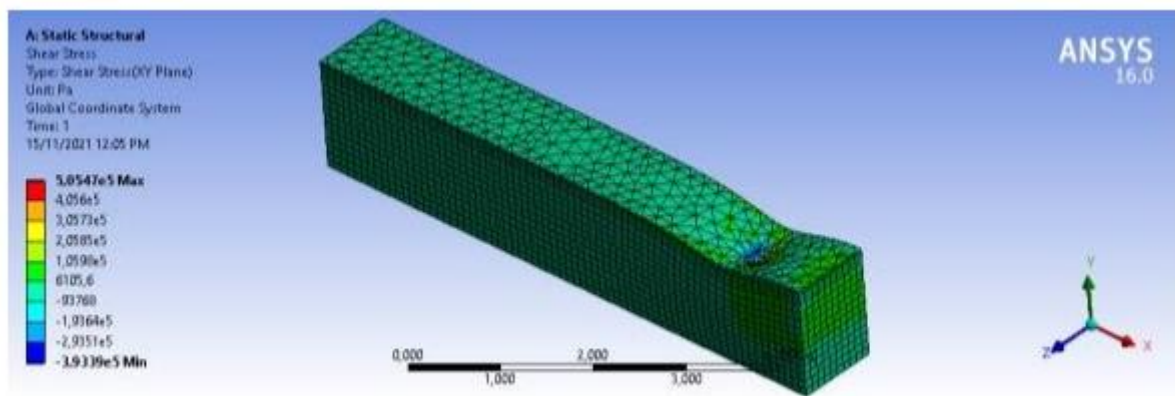
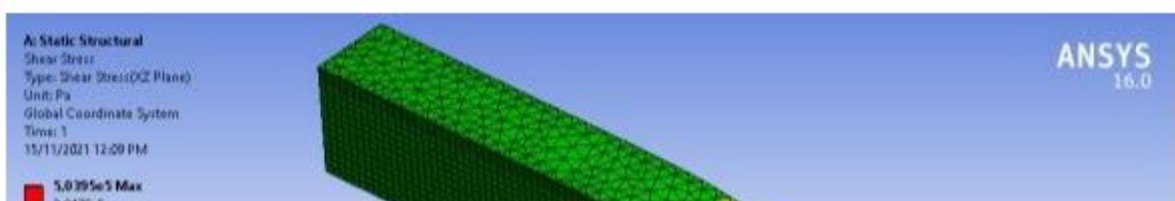


Figure 79 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N02 (Plan XY)



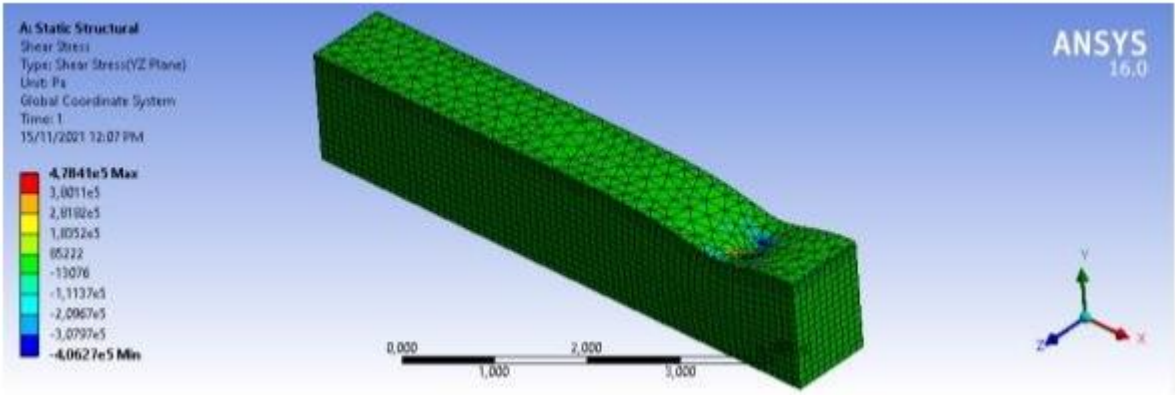


Figure 81 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N02 (Plan YZ)

Déformation Total (chaussée renforcée Position N03) BB/GB/GNT:

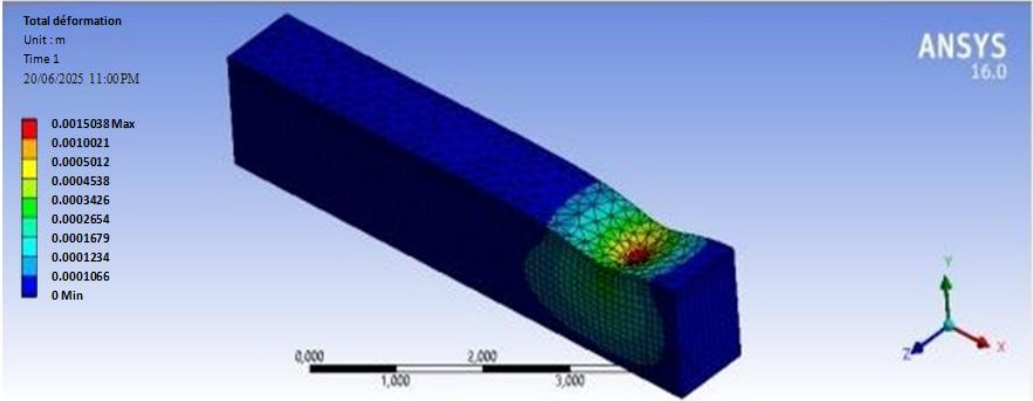
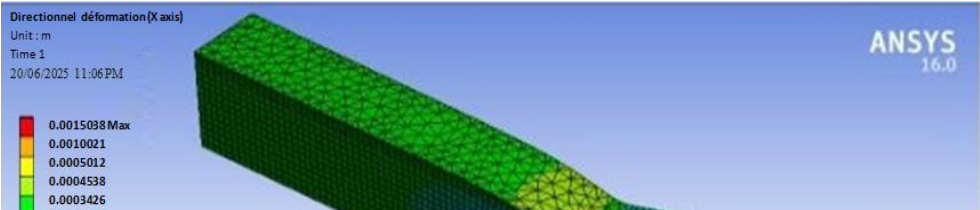


Figure 82 : Déformation Total d'une chaussée renforcée Position N03

Déformation Directionnel :



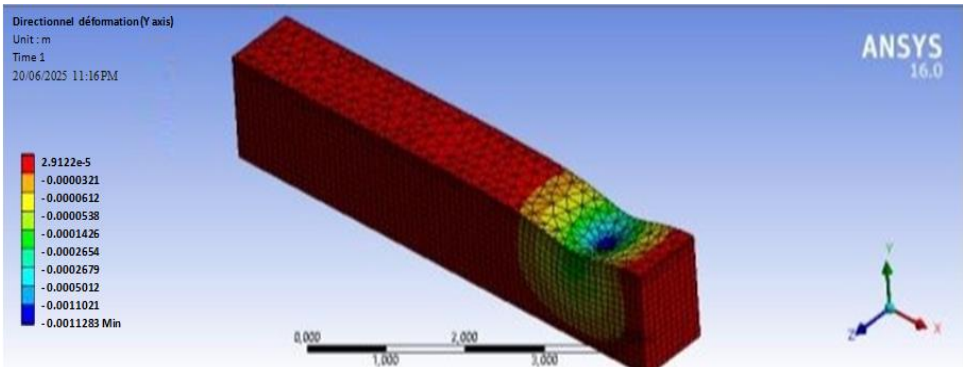


Figure 84 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N03 (Axe Y)

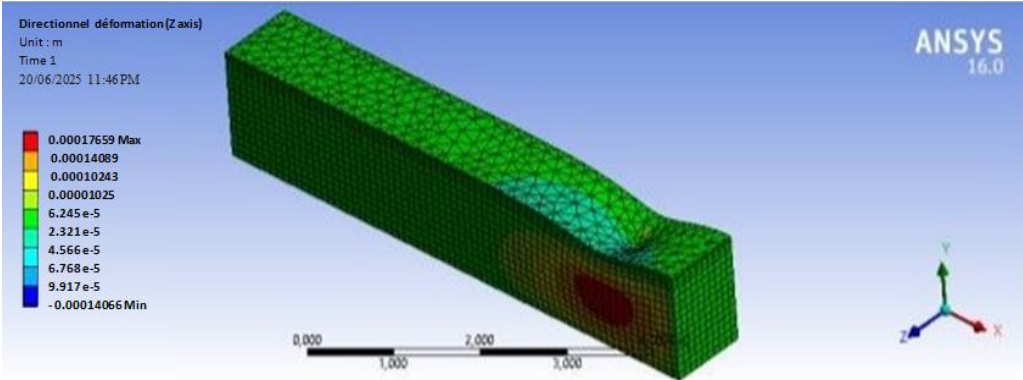
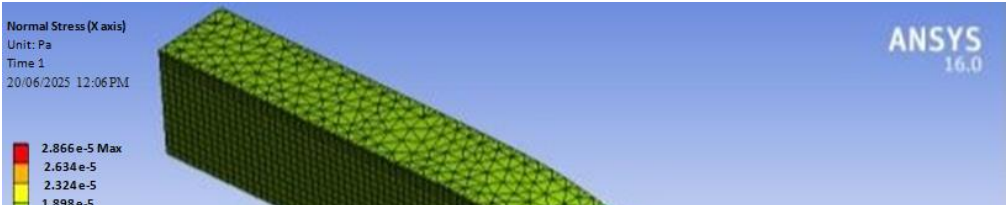


Figure 83 : Déformation Directionnelle d'une chaussée renforcée Position N03 (Axe Z)

Les contraintes normales :



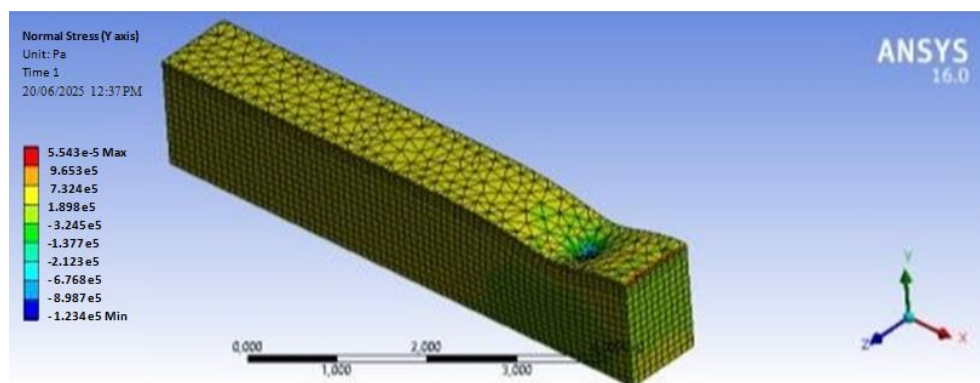


Figure 87 : Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N03 (Axe Y)

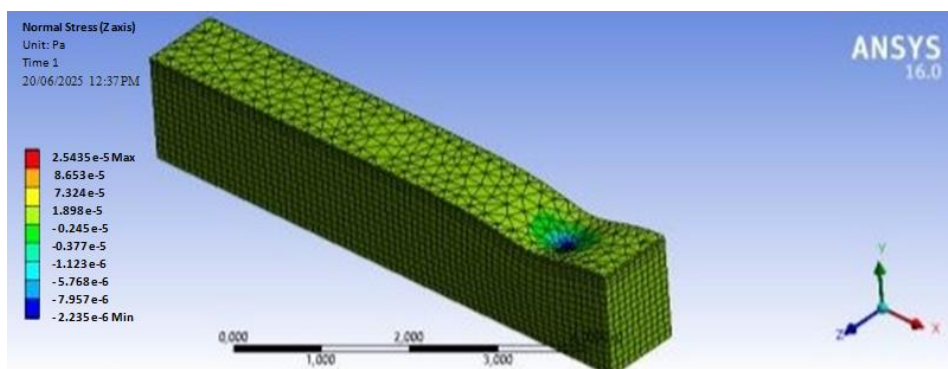


Figure 88: Les contraintes normales d'une chaussée renforcée Position N03 (Axe Z)  
Les contraintes de cisaillement :

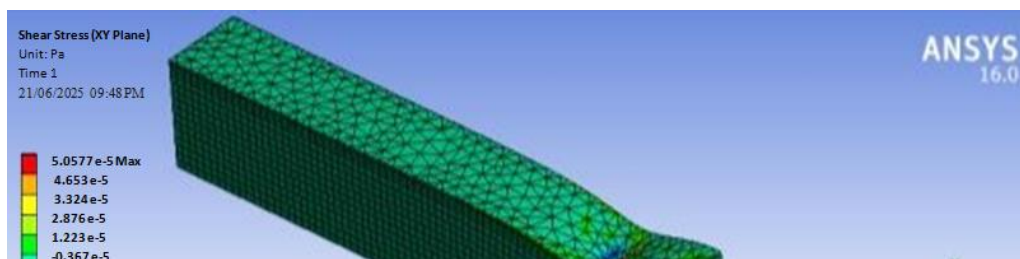


Figure 85 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N03 (Plan XY)

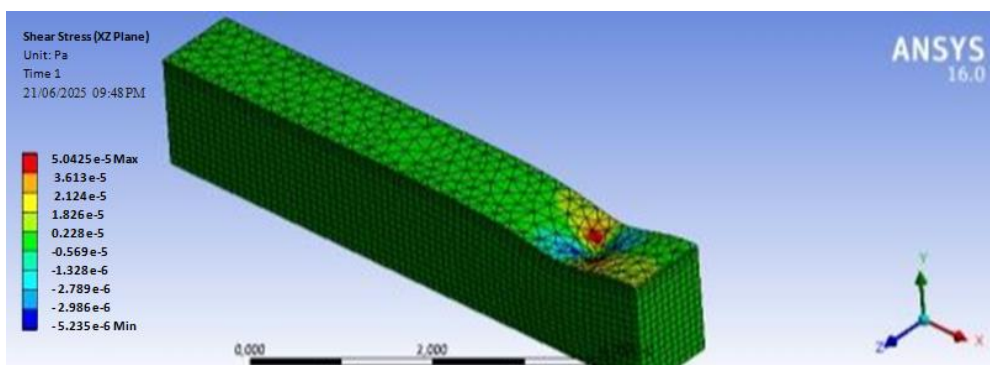


Figure 90 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N03 (Plan XZ)

Figure 90 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N03 (Plan XZ)

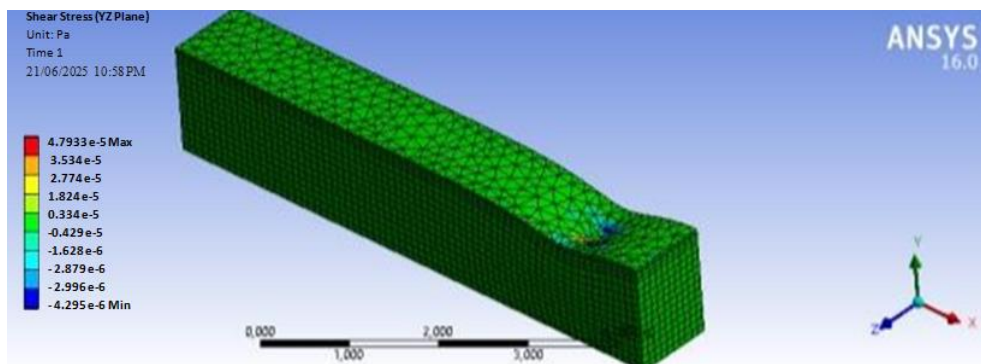


Figure 86 : Les contraintes de cisaillement d'une chaussée renforcée Position N03 (Plan YZ)

Les tableaux ci-dessous regroupent les résultats numériques obtenir par

Les tableaux ci-dessous regroupent les résultats numériques obtenir par modélisation en élément finis d'une chaussée souple avec trois cas de simulation

Simulation d'une chaussée souple sans renforcement [9]

Simulation d'une chaussée souple renforcée par géogrille (la nappe de géogrille se trouve entre le béton bitumineux et le grave bitumineux) [9]

Simulation d'une chaussée souple renforcée par géogrille (la nappe de géogrille se trouve entre le grave bitumineux et GNT)

**Tableau 8 : Résultats numériques obtenir par modélisation en élément finis d'une chaussée souple avec trois cas de simulation.**

		Déformation non renforcée [9]	Déformation renforcée position 1[9]	Déformation renforcée position 2[9]	Déformation renforcée position 3
Déformation totale		0.0011583	0.0015092	0.0015086	0.0015038
Déformation directionnelle	X	0.00015218	0.00015092	0.00015086	0.00015038
	Y	2.9635*10 <sup>-5</sup>	2.891*10 <sup>-5</sup>	2.9172*10 <sup>-5</sup>	2.9122*10 <sup>-5</sup>
	Z	0.00017826	0.00017692	0.00017709	0.00017659
Contrainte normale	X	2.9174*10 <sup>-5</sup>	2.7341*10 <sup>-5</sup>	2.892*10 <sup>-5</sup>	2.866*10 <sup>-5</sup>
	Y	5.6157*10 <sup>-5</sup>	5.6231*10 <sup>-5</sup>	5.639*10 <sup>-5</sup>	5.543*10 <sup>-5</sup>
	Z	2.564*10 <sup>-5</sup>	2.3785*10 <sup>-5</sup>	2.5403*10 <sup>-5</sup>	2.5435*10 <sup>-5</sup>
Contrainte de cisailent XY	X	5.0001*10 <sup>-5</sup>	5.1181*10 <sup>-5</sup>	5.0547*10 <sup>-5</sup>	5.0577*10 <sup>-5</sup>
	Y	5.0738*10 <sup>-5</sup>	4.8645*10 <sup>-5</sup>	5.0395*10 <sup>-5</sup>	5.0425*10 <sup>-5</sup>
	Z	4.8075*10 <sup>-5</sup>	4.8075*10 <sup>-5</sup>	4.7841*10 <sup>-5</sup>	4.7933*10 <sup>-5</sup>

Après l'étude de ces trois cas on remarque bien que déformations, les contrainte normal et les contraintes de cisaillement minimal se trouve dans le cas où la nappe de géogrille est entre la couche de béton bitumineux et la couche grave bitumineux) y'a pas un grand changement des résultats sont approximées avec ou sans le fibre de verre donc on se cas le fibre de verre ce n'est pas le bon choix, la même chose les résultats obtenus pour position N°03 (BB/GB/GNT) sont presque identique que la position N°01 et N°02 alors il faut l'ai changé par un autre fibre qui améliore mieux les caractéristiques de la chaussée pour les garder on bon états a une longue durée.

## 5.8 Conclusion :

Aux vues de nos résultats des calculs effectués à partir de logiciel ANSYS

des conclusions intéressantes semblent apparaitre.

Nous avons effectué la simulation d'un corps de chaussée souple en trois étapes :

Modélisation sans renforcement

Modélisation avec renforcement et la nappe de géogrid se trouve entre le béton bitumineux et le grave bitumineux

Modélisation avec renforcement et la nappe de géogrid se trouve entre le grave bitumineux et la couche de fondation

Modélisation avec renforcement et la nappe de géogrid se trouve entre le béton bitumineux et grave bitumineux et la couche de fondation

A partir de ces calculs ont permis de tirer les conclusions suivantes :

La présence de la nappe de géogrid ne réduit pas les déformations totales ainsi que les contraintes normales et les contraintes de cisaillement suite à l'application de la charge par rapport au cas non renforcé.

La position optimale (position 1) de la nappe de géogrid dans un corps de chaussée souple est entre la couche de béton bitumineux et la couche grave bitumineux est plus fiable par rapport d'autres positions 2 et 3.

## CONCLUSION GENERALE

La chaussée est une structure très complexe, à cause de la complexité du comportement des matériaux constitutifs (viscoélastique/viscoplastique pour la couche du bitume et élastique /élastoplastique pour les couches inférieures), mais aussi à cause de la grande variation, complexité et multitude des chargements que celle-ci peut avoir (freinage, agression climatiques...) qui agissent à long terme

Ce travail est dans objectif consistait de la détermination de la position la plus idéal de la nappe de géo grille dans un corps de la chaussée souple. Ensuite on a entamé la partie la modélisation en utilisant le logiciel << ANSYS >> et le MEF dont le but de déterminé les contraintes et les déformations les plus optimales.

Pour cela, on a constaté que les géo grilles être efficacement employés pour :

La réduction de la propagation des remontées des fissures

Le fonctionnement comme nappe de renforcement en plus son rôle de séparateur

Réduire l'épaisseur du revêtement bitumineux

Réduire l'épaisseur de la chaussée

Réduire les contraintes et déformations

La modélisation faite nous a permis de savoir la position idéale pour la nappe géo grille qui peut donner des résultats meilleurs dans la pratique donc La position optimale (position 1) de la nappe de géogrille dans un corps de chaussée souple est entre la couche de béton bitumineux et la couche grave bitumineux est plus fiable par rapport d'autres positions 2 et 3.

Enfin ce projet, qui représente pour nous une première expérience, nous a permet de transposer nos connaissances théoriques et pratiques. En particulier un grand changement des résultats sont approximées avec ou sans le fibre de

## Conclusion générale

verre donc on va juger que notre travail relatif pratiquement au choix de type de fibre et leurs caractéristiques physiques en plus on peut ajouter comme proposition dans les futures études l'effet de température et l'épaisseur de fibre.

## Références

- [1]. L'aimouche, N. &Ikhlef, S. (2021). Durability assessment of flexible pavements under combined traffic and environmental loads. *International Journal of Pavement Engineering*.
- [2]. Mesegmine, A. & Houari, H. (2022). Matériaux composites pour le renforcement des infrastructures routières. Presses des Ponts.
- [3]. Doré, G. (2009). Conception et dimensionnement des chaussées - Principes et méthodes\*. Presses de l'Université Laval.
- [4]. L'aimouche, N. &Ikhlef, S. (2021). Durabilityassessment... (op. cit.)
- [5]. Ministère des Travaux Publics Algérie (2021). Rapport annuel sur l'état du réseau routier national.
- [6]. Di Benedetto, H. &Corté, J.-F. (2004). \*Matériaux routiers bitumineux - Tome 2. Lavoisier.
- [7]. Mangiafico, S. et al. (2018). Thermal sensitivity of asphalt mixtures. *Materials & Design*.
- [8]. Hardin, B.O. &Drnevich, V.P. (1972). Shear modulus and damping in soils. *JSMFD*.
- [9]. Liamouche Asma, Ikhlef Lamia (2020/2021) Mémoire PFE, université de Blida 1, Influence d'ajout de fibre de composite sur le comportement des chaussées souples .
- [10]. Attia, M. (2020). Viscoelastic behavior of bituminous interfaces. *Construction and Building Materials*.
- [11]. LCPC-Airbus-STBA (2001). Étude des déformations des chaussées aéroportuaires.
- [12]. Mesegmine& Houari (2022). Matériaux composites... (op. cit.)
- [13]. Sebaaly, P.E. et al. (1986). Dynamic analysis of FWD data. *Transportation Research Record*.
14. Banque Mondiale (2020). Infrastructure routière en Afrique du Nord.

15. TRB (2022). Best Practices for Composite Reinforcement. Transportation Research Board.

[16]. L'aimouche, N. & Ikhlef, S. (2021). Durability assessment of flexible pavements under combined traffic and environmental loads. International Journal of Pavement Engineering.

[17]. IbroMaiguizo, A. (2012). Pathologies des chaussées : Mécanismes de dégradation et méthodes de diagnostic. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.

[18]. Doré, G.\*\* (2009). Conception et dimensionnement des chaussées. Presses de l'Université Laval.

[19]. PIARC\*\* (2017). Road Pavement Preservation. World Road Association.

[20]. Lekarp, F. & Dawson, A. (1998). Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials. Construction and Building Materials.

[21]. Huang, Y.H. (2004). Pavement Analysis and Design. Pearson Prentice Hall.

[22]. Mangiafico, S. et al. (2018). Thermal sensitivity of asphalt mixtures. Materials & Design.

[23]. Mesegmine, A. & Houari, H. (2022). Matériaux composites pour le renforcement des infrastructures routières. Presses des Ponts.

[24]. Mesegmine & Houari (2022). Op. cit.

[25]. IbroMaiguizo (2012). Op. cit.

[26]. Batata, M. (s.d.). Guide méthodologique d'auscultation visuelle des chaussées. Ministère des Transports.

[27]. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (2012). Manuel d'utilisation ALIZE III.

[28]. L'aimouche & Ikhlef (2021). Op. cit.

[29]. ASTM D6433 (2021). Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys.

[30]. TRB (2022). Pavement Management Guide. Transportation Research Board.

[31]. Mesegmine, A., & Houari, H. (2022). Matériaux composites pour le génie civil : Conception et applications. Presses Universitaires de l'ING.

[32]. Gay, D., & Hoa, S. V. (2007). Composite materials: Design and applications (3rd ed.). CRC Press.

[33]. Mallick, P. K. (2007). Fiber-reinforced composites : Materials, manufacturing, and design (3rd ed.). CRC Press.

[34]. L'aimouche, L., & Ikhlef, N. (2021). Matériaux composites avancés : Renforts et applications structurelles. Éditions Technip.

[35]. Mesegmine & Houari (2022)

[36]. TRB (Transportation Research Board). (s. d.).

[37]. SMABTP. (s. d.). Guide des matériaux composites en réparation des ouvrages. SMABTP Éditions.

[38]. Mesegmine & Houari (2022) couvre les techniques (moulage au sac, stratification, etc.).

[39]. Mesegmine, A., & Houari, H. (2022). Matériaux composites pour le génie civil : Conception et applications\*. Presses Universitaires de l'ING.

[40]. S&P Reinforcement. (s. d.). Technical manual for carbon fiber geogrids in pavement rehabilitation.

## REFERENCE DES TABLEAUX

- [1]. [LCPC-SETRA, "Catalogue des structures de chaussées neuves",
- [2]. [L'aimouche, A., & Ikhlef, K. (2021). Titre de la source. Adaptation par [Auteur(s)], 2025.]
- [3]. [Maiguizo, I. (2012). Titre de la source. Adaptation par [Auteur(s)], 2025.]
- [4]. [Mesegmine, A., & Houari, H. (2022)
- [5]. SETRA / LCPC (2013). Guide technique sur la conception et dimensionnement des chaussées souples.

## REFERENCES DES FIGURES

[1]. GTR (Guide des Terrassements Routiers) (2000). Chapitre 3 : Couches de forme et PST

[2]. SETRA (2013). Guide technique pour la conception et la réalisation des structures de chaussées.

[3]. SETRA/LCPC, Conception et dimensionnement des structures de chaussées, Guide technique, 1997.

[4]. Huang, Y.H. (2004). Pavement Analysis and Design (2nd Edition). Pearson Prentice Hall.

[5]. [LAVOC. (2023). Mesures d’empreinte de pneu Super Single.

[6]. Boussinesq, J. (1885). Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Gauthier-Villars.

[7]. AASHTO T 315 (2020). Standard Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)

[8]. Huang, Y.H. (2004). Pavement Analysis and Design (2nd ed.), Chapter 20: Pavement Distress.

[9]. [http://fsm.univ-tiaret.dz/docs/cours/C\\_M1\\_CM\\_les%20composites.pdf](http://fsm.univ-tiaret.dz/docs/cours/C_M1_CM_les%20composites.pdf),

[10]. <https://www.ecoledelair.fr/images/pdf/Chapitre5-ChausseesAeroportuaires.pdf>

[11]. SETRA, LCPC. (1998). Conception et dimensionnement des structures de chaussées.