# الجــمـهـوريــــة الجـزائـريـة الديمـقـراطيـة الـشـعبيـة REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la RechercheScientifique

UNIVERSITÉ DE SAÏDA- Dr MOULAY TAHAR

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil et d'Hydraulique



#### **MEMOIRE**

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

Spécialité : Géotechnique

Par: Mr. ZERAGUET MOHAMED

Mr. HOCINI DJELLOUL

# Modélisation du comportement thermodynamique des chaussées souples

Soutenu, devant le jury composé de :

M. HARBIT M.Y Université Dr Moulay Tahar-Saida Président

M. HACHEMI Houari Université Dr Moulay Tahar-Saida Encadreur

Mme. GHEFFIR M. Université Dr Moulay Tahar-Saida Examinateur

Année universitaire 2020/2021

# REMERCIEMENT

Avant tout, louange à «ALLAH», notre créateur et maitre de l'univers, de toutes ces boutés, s'avoir envoyer à nous tous le prophète « Mohamed » (I) qui doit être notre premier éducateur, puis de nous avoir donné tout de courage pour terminer ce travail de recherche.

#### Un très grand merci à:

Notre promoteur' **M**<sup>r</sup> **Hachemi Houari'** pour nous avoir encadré et orienté tout au long de cette recherche.

nos parents qui nous ont suivis pendant nos études

Nous remercions chaleureusement nos familles respectives pour toute l'aide et soutien,

moral et économique, qu'ils nous ont apporté tout au long de nos études. Nous espérons être à la hauteur de leurs espérances et nous montrer dignes de leurs confiances et de leurs encouragements.

Nous adressons nos remerciements chaleureusement tous les professeurs qui nous ont enseignés au cours des études primaires jusqu'aux années du cursus universitaire pour l'obtention du diplôme de master.

Et bien sûr, merci à tous les travailleurs de l'universitaire saida et à tous nos amis avec qui nous avons gardé des souvenirs très agréables des bons moments vécus ensemble.

En fin, no vifs remerciements aux membres de jury et à son président avec qui nous allons soutenir ce mémoire et juger de sa qualité.

Et pour finir, un dernier remerciement à toute la promotion 2013-2014 de l'hydraulique de l'université **Dr. Moulay Tahar**, tout en leurs souhaitions un avenir plein de réussite.

ZERAGUET MOHAMED

Hocini Djelloul

# **Dédicaces**

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui me sont chères, mes deux chers parents pour leurs soutiens,

A tout ma grande famille ZERAGUET: I made Boualem Kamel Mohamed

Amine et Ayoub allaa eddine chams tassnim....

San oublier tous mes amis Alli baghdad Abde el kader Makhlouf Amar

Je tiens à dédie ce mémoire a mon promoteur  $\mathcal{M}^R$  CHAFI pour ces orientations et ses conseils judicieux.

A tout mes professeurs.

A tout mes collèges de promotion de 2020et 2021.

ZERHGUET MOHHMED

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui me sont chères, mes deux chers parents pour leurs soutiens,

A tout ma grande famille hocini: I made Mohamed Miloud Abde el kader karim .....

San oublier tous mes amis kada ahmed alli

Je tiens à dédie ce mémoire a mon promoteur  $\mathcal{M}^{\mathbb{R}}$  hachemi houari pour ces orientations et ses conseils judicieux.

A tout mes professeurs.

A tout mes collèges de promotion de 2021.

Hocini Djelloul

# **SOMMAIRE**

Titre page

#### **INTRODUCTION GENERALE:**

## **CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES CHAUSSEES**

1. Introduction :6
2. Structure d'une chaussée souple :6
2.1. Le sol support :
2.2. La couche de forme :7
2.3. La couche d'assise :7
2.4. La couche de surface :8
3 Contraintes induites dans la chaussée :8
3.1 État de contrainte dans le revêtement sous une charge statique :8
3.2. Dégradation des chaussées souples :
3.2.1. Vérification en fatigue des structures et de la déformation du sol-support Matériaux traités au bitume(MTB) :
3.2.2. Matériaux traitées aux liants hydrauliques (MTLH) :10
3.2.3. Matériaux non traités(MNT):10
4. Comportement des matériaux bitumineux dans les structures routières :10
4.1. Sollicitation des couches en enrobés bitumineux :10
4.1.1. Effet du trafic :
4.1.2. Effet de la température :
4.2.Comportement mécanique des enrobés bitumineux :12
4.2.1. Comportement viscoélastique linéaire (VEL) :14
4.2.2. Module complexe (E*) :
5. Modélisation viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux :16
5.1. Assemblages discrets de ressorts et d'amortisseurs – spectre discret :16
5.1.1. Ressort :
5.1.2. Amortisseur :

5.2. Modèle de Maxwell :
5.3. Modèle de Kelvin-Voigt :18
5.4. Modèle de Maxwell Généralisé (MG) :19
5.5. Modèle de Kelvin-Voigt généralisé :
6. Orniérage :20
6.1. Orniérage petit rayon :21
6.2. Ornières structurelles :22
7. Conclusion :
CHAPITRE II : DIMENSIONNEMENT DE CORPS D'UNE CHAUSSEE
1. Introduction :24
2. Méthodes de dimensionnement :
2.1. Approches empiriques :
2.2. Approche Analytique (théorique) :24
2.2.1. Modèle de Boussinesq (1885) :25
2.2.2. Modèle bicouche :
2.2.3. Modèle de Hogg (1938) :
2.2.4. Le modèle de Westergaard (1926) :28
2.2.5. Les modèles multicouches (Burmister 1943) :29
3. Facteurs affectant la conception des chaussées flexibles : 30
3.1. Trafic et chargement :30
3.2. Modèles structurels :
4. Largeur et espace entre les pneus jumelés :33
5. Contact pneu-chaussée :
5.1. Modélisation de la charge du pneu :34
5.2.Charge/essieu :
5.3.Type de pneu :
5.4. Influence de la vitesse de circulation :

5.5.	. Influence de la température :	39
6. A	Analyse dynamique:	40
6.1.	. chargement de te rministe :	40
6. 2	C.chargement aléatoire :	42
6.3.	. Analyse en dynamique des chaussées :	43
7. c	conclusion:	43
СНАРІТ	TRE III : MODELISATION NUMERIQUE SOUS ANSYSY	
1.	Introduction:	44
2.	Analyse dynamique :	
2.1	Analyse modale :	
2.2	•	
2.3	Analyse transitoire :	45
3. N	Modélisation Thermo-mécanique de la plaque FGM:3	47
3. 1	. Description de l'élément solide (SOLID186):	48
3.2.	. Les Dimensions et le Maillage:	49
3.3.	. Matériel Model :	53
4. (	Conditions aux limites et chargement :	53
5. (	Conclusion :	55
СНАРІТЬ	RE IV :RESULTATS ET DISCUSSIONS	
1. <b>I</b> r	ntroduction	56
2. F	Résultats:	56
<b>2.</b> 1	1. Déplacement verticale (UZ):	56
2.2	2.Déformation verticale (ɛz):	59
2.3	3. Spectre d'accélération :	63
3. (	Conclusion:	64

## LISTE DES FIGURES

## LISTE DES FIGURES

Titre pag	ge
Figure (I .1): Structure d'une chaussée souple	6
Figure(I.2): Corpsd'unechausséesouple	7
<b>Figure(I.3) :</b> Schématisation des états de contraintes dans une chausséesous chargement statique	.9
Figure (I.4): Sollicitations induites par le trafic	11
Figure (I.5) : Sollicitations induites par la température	12
Figure (I.6) :Comportement des enrobés bitumineux	3
Figure (I.7): Variation de la contrainte et de la déformation pour un matériau visco élastique linéaire	15
Figure (I.8) :Schéma du ressort	16
Figure (I.9) :Schéma de l'amortisseur.	17
Figure (I.10): Schéma du modèle de Maxwell	l <b>7</b>
Figure (I.11) :Schéma du modèle de Kelvin-Voigt	18
Figure (I.12) :Schéma du modèle de Maxwell généralisé	19
Figure (I.13) :Schéma du modèle de Kelvin-Voigt généralisé	19
Figure (I.14): Types d'ornières dans les chaussées souples	21
Figure (I.15): Orniérage des couchesbitumineuses de surface	21
Figure (I.16): Orniérage du sol support	22
Figure (II.1): Diffusion de la contrainte selon Boussinesq	26
Figure (II.2): Travail en flexion d'une couche liée	26
Figure (II.3): Diffusion de la contrainte selon Hogg.	28
Figure (II.4): Diffusion de la contrainte selon Westergaard Plus tard Lagrange	28
Figure (II.5): Modèle de Burmister	29
Figure (II.6): Présentation de la charge équivalente à un seul essieu (ESAL	30
Figure (II.7): Types de groupes d'essieux pris en compte dans Austroads 2004b	Ĺ
Figure (II.8): Variation des déformations longitudinales pour un camion équipé de pneu à bande large	32
Figure (II.9) :Coupe transversale d'une SADT typique	3

# LISTE DES FIGURES

Figure (II.10) :Longueur et largeur de la zone de contact pneu-chaussée	34
Figure (II.11): Simplification de la surface de contact d'un pneu (Huang, 1993)	35
Figure( II.12) a : Pneu jumeau (Michelin 295/80R22)	37
Figure( II.13) b : Pneu super single (Michelin 385/65R22.5)	37
figure (II.14): Influence du type de pneu sur la forme de l'orniérage	38
figure (II.15): Influence de la vitesse de circulation sur l'orniérage	39
figure (II.16): Influence de la température sur le développement de l'orniérage	39
figure (II.17): Chargement harmonique	40
figure (II.18): Chargement périodique anharmonique	41
figure (II.19): Chargement impulsif	41
Figure( II.20): Sollicitation entretenue.	42
Figure (II.21): Chargement aléatoire	42
Figure(III.1): Amplitudes du déplacement au nœud milieu en fonction de la fréquence	e sous
chargement harmonique	46
Figure (III.2): Time-dependent loading on the bracket	47
Figure (III.3):: Définir le type d'élément SOLID186	
Figure (III.4): Géométrie solide structurelle homogène SOLID186 [20]	49
Figure (III.5): Différents couches du corps de chaussée	50
Figure(III.6) : Dimensions en plan de la chaussée	50
Figure(III.7): Vue 3D du corps de chaussée	51
Figure(III.8): Dimension en plan de la moitie de la chaussée	51
Figure(III.9) :Vue 3D de la moitie de la chaussée	52
Figure(III.10) :Maillage du modèle	52
Figure(III.11) :Définir le modèle de comportement des matériaux et les valeurs	
	33
Figure(III.12) :Conditions aux limites de plaque FGM	

# LISTE DES FIGURES

Figure(III.14) :Déplacement du corps de chaussée suivant "z"	55
<b>Figure (IV.1):</b> Déplacement suivant l'axe UZ pour une charge 40KN et T=20C°- t=0.0075s	56
<b>Figure (IV.2):</b> Déplacement suivant l'axe UZ pour une charge 40KN et T=20C°-t=0.015s	57
<b>Figure (IV.3):</b> Déplacement suivant l'axe UZ pour une charge 40KN et T=20C°-t=0.0225s	57
<b>Figure (IV.4):</b> Déplacement suivant l'axe UZ pour une charge 40KN et T=20C°-t=0.075s	58
Figure (IV.5): Variation du déplacement verticale par rapport à la température	58
<b>Figure (IV.6):</b> Déformation suivant l'axe Z pour une charge 40KN et T=20C°	59
<b>Figure (IV.7):</b> Déformation suivant l'axe Z pour une charge 40KN et T=30C°	59
<b>Figure (IV.8):</b> : Déformation suivant l'axe Z pour une charge 40KN et T=45C°	60
Figure (IV.9): Déformation-Z dans sous la charge du pneu	60
<b>Figure (IV.10):</b> Déformation suivant l'axe X pour une charge 40KN et T=20C°	61
<b>Figure (IV.11):</b> Déformation suivant l'axe X pour une charge 40KN et T=30C°	61
<b>Figure (IV.12):</b> Déformation suivant l'axe X pour une charge 40KN et T=45C°	62
Figure (IV.13): Déformation-X sous la charge du pneu	.62
Figure (IV.14): Spectre d'accélération-Y sous la charge du pneu	63
Figure (IV.15): Spectre d'accélération-Y sous la charge du pneu	63
Figure (IV.16): Spectre d'accélération-Y sous la charge du pneu	.64

# LISTE DES TABLEAUX

# LISTE DES TABLEAUX

Titre	page
Tableau (1.1) : Différents états de contraintes observés dans le revêtement	9
Tableau (II-1): Surface de contact des pneus à base large fabriqués par Goodyear (d'après	Goodyear)35
Tableau (II.2): Surface de contact des pneus à base large fabriqués par Michelin (Michelin	ı Inc.1997) <b>36</b>
Tableau (III.1): Caractéristiques mécanique et physique des enrobés bitumineux	47
Tableau(III.2): Caractéristiques mécanique et physique du GNT et sol support	47

**RESUME** 

ملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة السلوك الديناميكي الحراري تحت تأثير درجة الحرارة وتحميل مركبات البضائع الثقيلة

وارتفاع وتيرة مرورها على الضرر الناجم عن تخدد الأرصفة المرنة من خلال فرض نماذج استقصائية باستخدام من

برنامج العناصر المحدودة (ANSYS (APDL) ، ولكن في هذا العمل ركزنا على التحليل الديناميكي العابر لثلاثة أبعاد

من جسم الرصيف وسطح ملامس للإطار إلى الرصيف لنموذج إطار فائق بسيط.

الكلمات المفتاحية: الديناميكا الحرارية، الرصيف المرن، سطح التلامس

1

**RESUME** 

Résumé

Le but de cette recherche est d'étudier le comportement thermo-dynamique sous l'effet de la

température et du chargement des poids lourds et de leur fréquence de passage élevé sur les

dommages dus à l'orniérage des chaussées souples en imposant des modèles d'investigation à

l'aide du logiciel éléments finis ANSYS (APDL), mais dans ce travail on a concentré sur

l'analyse dynamique transitoire pour une trois dimension du corps de chaussée et une surface

de contacte pneu-chaussée pour un modèle de pneus super simple.

Mots clés : thermo-dynamique, chaussée souple , surface de contacte

2

**RESUME** 

**Abstract** 

The aim of this research is to study the thermodynamic behavior under the effect of the

temperature and the loading of heavy goods vehicles and their high frequency of passage on

the damage due to the rutting of flexible pavements by imposing models of investigation

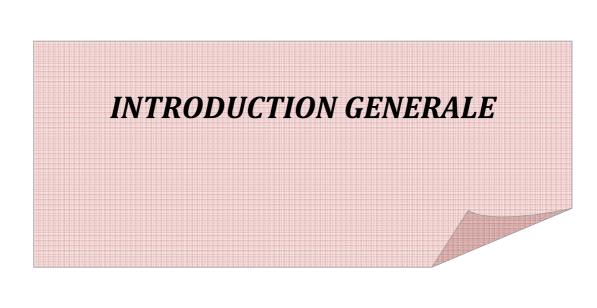
using the ANSYS finite element software (APDL), but in this work we focused on the

transient dynamic analysis for a three dimension of the pavement body and a tire-to-pavement

contact surface for a super tire model simple.

**Key words**: thermodynamic, flexible pavement, contact surface

3



#### INTRODUCTION GENERALE

Avec l'augmentation du volume du trafic routier, les problèmes de charges lourdes et de surcharge restent sérieux et l'orniérage est toujours l'une des maladies les plus graves avec les chaussées en bitume (chaussée souples). La recherche de l'orniérage des chaussées en bitume devient un problème difficile en raison de la propriété d'endommagement viscoélastique inhérente du mélange bitumineux et des divers facteurs externes, notamment la température, la charge, etc.

À l'heure actuelle, la méthode des éléments finis a une large application dans la recherche routière, et de nombreux chercheurs ont utilisé des logiciels d'éléments finis tels que ANSYS et ABAQUS pour étudier la déformation permanente du mélange bitumineux et l'orniérage de la chaussée souple.

Zhao et al. [1] ont utilisé ABAQUS pour établir un modèle de fluage par éléments finis 3D, constatant que l'orniérage de la chaussée sous différentes températures et charges montre une tendance de développement non linéaire. Sur la base du modèle Maxwell et du modèle Drucker-Prager, Teng et al. [2] ont utilisé ANSYS pour étudier la propriété de déformation de la couche de roulement et de la plate-forme respectivement, constatant que le niveau de charge et le module de la plate-forme ont une influence significative sur l'orniérage. Yao et al. [3] ont utilisé le modèle de fluage et le modèle élastique au sein d'ABAQUS pour étudier les corrélations entre la profondeur d'orniérage et le temps de charge, entre la profondeur d'orniérage et l'épaisseur de la couche de surface respectivement, constatant que les valeurs théoriques et les valeurs réellement mesurées sont cohérentes. Pirabarooban et al. [4] ont utilisé ABAQUS pour construire un modèle d'éléments finis 3D et ont adopté un modèle de fluage viscoplastique élastique pour étudier la corrélation entre les résultats de la simulation et les résultats de l'APA intérieur réellement mesurés. Xia [5] a utilisé ABAQUS pour établir un modèle d'éléments finis 3D pour le contact dynamique entre les roues et la surface de la route, et a prédit la réponse et les dommages de la surface de la route en analysant les fissures de fatigue et l'orniérage. Li et al. [6] ont utilisé ABAQUS pour établir un modèle d'éléments finis 2D sur la base du modèle élasto-plastique de Bailey-Norton et du modèle plastique de Mohr-Coulomb, ont étudié les performances anti-orniérage de quatre structures de chaussées différentes, ainsi que l'influence des facteurs tels que la température, la pression de contact des pneus et le nombre de charges sur la formation de l'orniérage. Cao et al. [7] ont utilisé ABAQUS pour établir un modèle d'éléments finis 3D et analysé les comportements élastiques viscoplastiques de la surface de la route susceptible de déplacer des charges, et ont proposé plusieurs solutions pour prévenir l'orniérage. Zhu et al. [8] ont utilisé ANSYS pour établir un modèle d'éléments finis 3D, et ont analysé la loi du développement de l'orniérage et ont proposé des mesures pour améliorer les performances anti-orniérage. Imaninasab et al. [9] ont utilisé ABAQUS pour établir un modèle d'éléments finis 3D afin d'analyser les performances anti-orniérage d'une chaussée en asphalte à grand espacement sous différentes teneurs en caoutchouc grâce à des tests de charge statiques et répétitifs. Hu et al. [10] ont utilisé ANSYS pour établir un modèle d'éléments finis 3D pour analyser la contribution de toutes les couches de mélange d'asphalte dense à l'orniérage.

Ce travail de mémoire de fin d'étude a pour but de développer un modèle numérique pour l'analyse dynamique des chaussées, et cela pour mieux comprendre le mécanisme de formation de l'orniérage et d'analyser le rôle de différents facteurs dans l'apparition de ce phénomène de dégradation.

Le travail de cette recherche comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre c'est une généralité sur les corps de chaussées souples, en plus des sollicitations induites et les déformations permanentes de ces structures.

Le second chapitre c'est une étude détaillé sur les différentes méthodes de dimensionnement des chaussées, ainsi l'analyse dynamique des structures de génie civil.

Le troisième chapitre donne une idée sur la modélisation dynamique dans le logiciel ANSYS utilisé dans la modélisation, et des brèves informations sur les étapes essentielle de la modélisation.

Le dernier chapitre est l'exposition des résultats avec une discussion afin de comprendre et interpréter les résultats.

En plus d'une introduction générale qui éclaircis la problématique de cette recherche et ces objectifs. Et on termine avec une conclusion générale.

# CHAPITRE I GENERALITE SULESCHAUSSEES

#### I.1.Introduction:

La chaussée est la partie d'une voie de communication affectée à la circulation des véhicules. Elle assure les déplacements des usagers et le transport des marchandises, quelles que soient les conditions météorologiques, dans des conditions de sécurité et de confort adapté au type d'itinéraire.

D'un point de vue mécanique, son rôle est de répartir les charges mécaniques sur le sol support, quelles que soient les conditions environnantes.

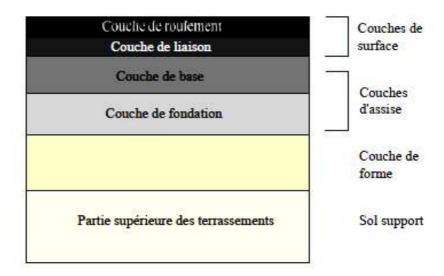
Il existe plusieurs types de chaussées qu'on peut regrouper en deux catégories

- ✓ chaussée souple est une chaussée bitumée.
- ✓ chaussée rigide est une chaussée faite principalement en béton armé.

Dans ce chapitre nous allons présentes les différentes composition d'une chaussée souple, et le comportement des enrobés bitumineux avec le problème de déformations permanent (orniérage) des structure routière souples.

#### I.2. Structure d'une chaussée souple :

La chaussée est une structure complexe composée de plusieurs couches. Chacune de ces couches est réalisée à l'aide de différents matériaux hétérogènes (souvent des mélanges de granulats et de bitume assurant la cohésion). Ce système multicouche repose sur un massif de sol (figure I.1). On peut distinguer les couches de forme (traitement du sol),une couche de base et les couches de surface (couche de liaison et roulement). La chaussée est dimensionnée pour supporter des sollicitations environnementales (notamment climatique)et mécanique [1].



*Figure (I.1):* Structure d'une chaussée souple[1].

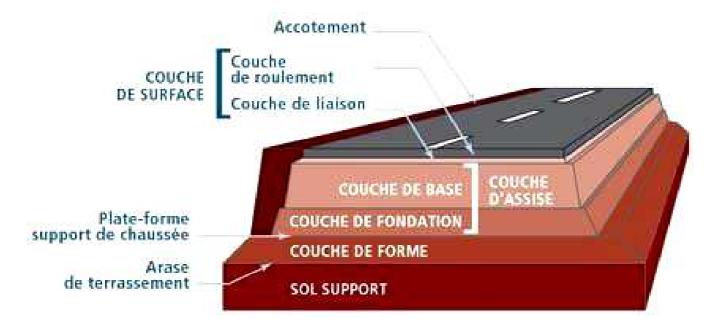


Figure (I.2): Corps d'une chaussée souple 3D[2].

- **I.2.1. Le sol support :** Le sol support sur lequel repose la couche de forme est fonction de la nature du terrain et sert de base à la structure.
- **I.2.2.** La couche de forme : Selon le type de chaussée, il est nécessaire de traiter la couche de forme pour réaliser les propriétés exigées pour la résistance de la chaussée. Cette couche peut-être une couche de sol naturel prête pour recevoir les charges des couches supérieures. Elle est rendu compacte à la densité souhaitable, près de la teneur en eau optimale. Elle contribue au nivellement et assure la circulation des engins pendant les travaux. Elle permet également d'homogénéiser les caractéristiques du sol support, le protégeant ainsi contre le gel[2].
- **I.2.3.** La couche d'assise : La couche d'assise est placée au-dessus de la couche de forme. Elle se compose parfois d'une couche de base et d'une couche de fondation qui sont souvent composées des matériaux granulaires tels que le sable, des pierres et des graviers concassés. Habituellement, les matériaux de ces couches incluent des conditions plus strictes que celle requises pour la couche de forme. Dans certains cas, pour augmenter les caractéristiques mécaniques des chaussées, elles peuvent être traitées avec du bitume ou du ciment. En général, elles apportent à la chaussée la résistance mécanique dont elle a besoin pour supporter les charges verticales générées par le trafic. Dans ce rôle, elles répartissent les charges sur la couche de forme et le sol support pour pouvoir maintenir les déformations à ce niveau de la structure dans des limites admissibles [2].

**I.2.4.** La couche de surface : La couche de surface est celle qui est en contact direct avec les charges du trafic.

Elle est souvent subdivisée en couche de roulement (qui est la couche supérieure nommée Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG), ou Béton Bitumineux Mince (BBM), ou Béton Bitumineux Très Mince (BBTM), ou Béton Bitumineux Drainant (BBDr)...) et une couche de liaison (inférieure et nommé Grave Bitume (GB)). Elle fournit des caractéristiques telles que le frottement, la lutte contre le bruit, la résistance à l'orniérage et le drainage.

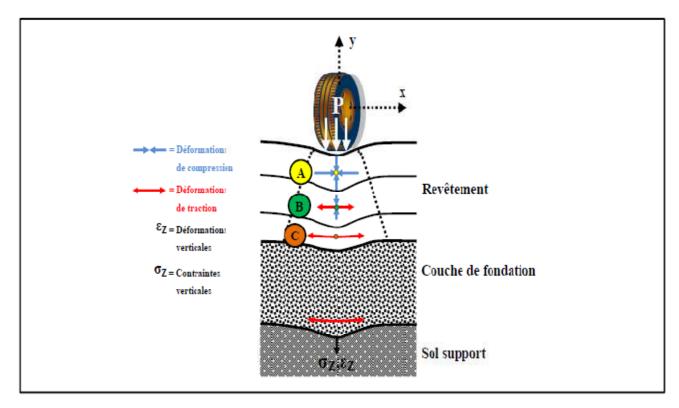
Elle doit assurer la sécurité et le confort des usagers, doit être imperméable à l'eau pour protéger les autres couches, notamment la couche de forme contre l'effet de l'affaissement par l'eau[2]..

#### I.3 Contraintes induites dans la chaussée :

Une chaussée, soumise à l'action de la circulation, subit plusieurs efforts et des contraintes se développent à l'intérieur de sa structure. Il est donc essentiel, pour tout concepteur, de connaître le plus précisément possible l'évolution des contraintes car l'action répétée des charges peut générer plusieurs défauts et problèmes dans la chaussée, tels que la fissuration par fatigue et l'apparition d'ornières. D'un point de vue analytique, deux types de sollicitations vont entraîner le développement d'états de contraintes différents dans la chaussée soit : 1) la sollicitation par charge statique et, 2) la sollicitation par l'application de charges cycliques. Il est à noter que dans le cadre de cette thèse, nous nous concentrerons essentiellement sur une description détaillée des phénomènes se rapportant au revêtement.

#### I.3.1 État de contrainte dans le revêtement sous une charge statique :

De par la théorie de l'élasticité, et sous l'action d'une charge statique, les contraintes à l'intérieur du revêtement peuvent être schématisées suivant la Figure (I.3) et se définir comme indiqué dans le Tableau (I.1)



Figure(I.3) : Schématisation des états de contraintes dans une chaussée sous chargement statique [2].

Point	État de la contrainte	Valeurs <sup>1</sup>	Effet sur la chaussée	
A	Contrainte de compression selon les axes x et y     Contrainte y légèrement supérieure à x	$\sigma_{y_A} \ge \sigma_{x_A} \ge 0$	<ul> <li>Tassement du matériau en y et dilatation en x par effet de compression de volume</li> <li>Propice aux déformations permanentes</li> </ul>	
В	<ul> <li>Transition entre les 2 modes de sollicitation</li> <li>Diminution de la contrainte en compression selon l'axe y, et contrainte de traction selon l'axe x. Cette dernière augmente en fonction de la profondeur</li> </ul>	$\sigma_{\mathbf{y_B}} \ge 0 \ge \sigma_{\mathbf{x_B}} \approx -\sigma_{\mathbf{y_B}}$	<ul> <li>Effet déstabilisant sur les matériaux</li> <li>Propice à l'augmentation de la vitesse d'apparition des déformations permanentes : l'orniérage n'est pas seulement le résultat de déformations permanentes de la couche de roulement</li> </ul>	
C	<ul> <li>Contrainte de traction suivant l'axe x : effet similaire à une plaque soumise à de la flexion</li> <li>Contrainte pratiquement nulle selon l'axe y</li> </ul>	$\sigma_{x_{\it c}}$ <0; $\sigma_{y_{\it c}}$ \approx 0	• État à l'origine de la fatigue des enrobés bitumineux	
Note 1 Une valeur positive indique un effet de compression et une valeur négative indique un effet de traction				

Tableau (I.1): Différents états de contraintes observés dans le revêtement

Cet état de contraintes ne correspond pas à la réalité : l'action de la circulation se fait plutôt dans un mode dynamique et non statique. L'ajout de notion de mouvement fait en sorte de rendre le chargement beaucoup plus complexe et variable dans le plan et le temps.

#### I .3.2. Fatigue des chaussées souples :

La dégradation des chaussées constitue, dans la plupart des cas, un des premiers indicateurs de l'évolution des caractéristiques structurelles et superficielles des chaussées.

Nous rappelons simplement que la fatigue est induite par le passage des véhicules (indépendamment de toute notion de temps) et est donc en soi un phénomène normal. D'une façon théorique, une chaussée est construite pour recevoir un nombre déterminé de passages véhicules à une charge donnée. Lorsque le nombre est dépassé, il y a en général fatigue excessive de la chaussée.

# I .3.2.1. Vérification en fatigue des structures et de la déformation du sol-support Matériaux traités au bitume(MTB) :

Il faudra vérifier que  $\varepsilon_t$  et  $\varepsilon_z$  calculées à l'aide (d'ALIZE), sont inférieures aux valeurs admissibles calculées, c'est-à-dire respectivement à  $\varepsilon_{t, ad}$  et  $\varepsilon_{z, ad}$ .

$$\varepsilon_z < \varepsilon_{z,ad}$$
 et  $\varepsilon_t < \varepsilon_{t,ad}$ 

#### I .3.2.2.Matériaux traitées aux liants hydrauliques (MTLH) :

Dans ce cas également, il faudra vérifier que les contraintes et déformation calculées par(ALIZE) sont inférieures aux contraintes et déformation admissibles calculées :

$$\varepsilon_z < \varepsilon_{z,ad}$$
 et  $t < t$ , ad

#### I .3.2.3. Matériaux non traités (MNT) :

Dans le cas de MNT la seule vérification est à faire sur le sol-support :

$$\varepsilon_z < \varepsilon_{z,ad}$$

#### I.4. Comportement des matériaux bitumineux dans les structures routières :

Afin d'apporter une vue générale sur les modes de dégradation ainsi que des types de comportement des matériaux bitumineux dans les couches de chaussées, les sollicitations externes auxquelles elles sont soumises sont présentées dans cette section, suivies par un classement des types de comportement des

matériaux bitumineux[3].

#### I.4.1. Sollicitation des couches en enrobés bitumineux :

Les principales sollicitations externes imposées sur les enrobés bitumineux sont les chargements mécaniques dus aux trafics et les sollicitations climatiques. Sous ces sollicitations, des phénomènes complexes, couplant mécanique, thermique, physique et chimie se produisent.

#### I.4.1.1. Effet du trafic :

L'effet du trafic est issu du passage des véhicules qui imposent un chargement sur la surface de la chaussée sous forme de chargements surfaciques répétés. Les amplitudes de chargement sont faibles, produisant des déformations de l'ordre de  $10^{-3}$ . Le calcul des efforts et des déformations, effectué par un modèle multicouche élastique linéaire isotrope, donne une bonne approximation des modes de fonctionnement de chaque couche suivant sa position en profondeur dans la structure (Figure I.4).

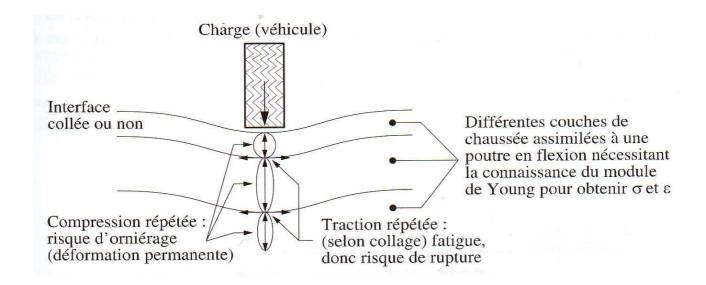
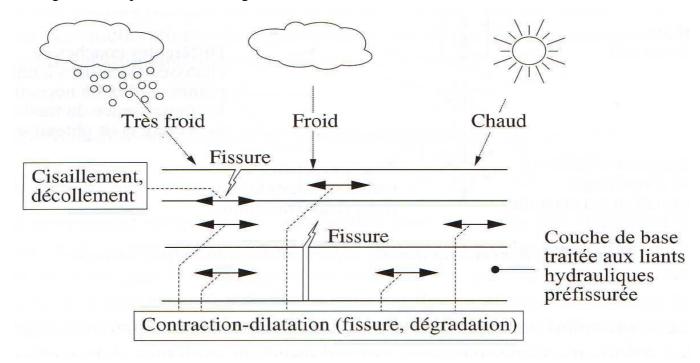


Figure (I.4): Sollicitations induites par le trafic [3]

Sous les sollicitations cycliques du trafic, la base des couches structurelles subit une traction répétée qui peut créer des micro dégradations et entrainer la ruine des couches. Ce phénomène de fatigue peut entrainer des fissures au travers de la chaussée. Dans le même temps, la partie supérieure de chaque couche est soumise aux efforts de compression répétée qui peuvent entrainer des déformations permanentes induisant un orniérage `a la surface de la chaussée [3].

#### I.4.1.2. Effet de la température :

Outre les chargements mécaniques, les chaussées subissent des chargements consécutifs aux variations de la température. Ces variations thermiques entrainent des changements de la rigidité du mélange : à température basse le mélange bitumineux est rigide et fragile tandis qu'à haute température la rigidité du mélange chute et que sa ductilité augmente[3].



**Figure (I.5)**: Sollicitations induites par la température [3]

D'autre part, le changement de température peut entrainer des contraintes et des déformations au sein des matériaux en raison des contractions-dilatations thermiques (Fig. 1.3). Ce phénomène est particulièrement important : il peut provoquer des fissures dues aux cycles thermiques `a basses températures ou des dégradations aux interfaces entre des couches[4].

#### I.4.2.Comportement mécanique des enrobés bitumineux :

Le comportement mécanique des enrobés bitumineux dépend de son comportement rhéologique, c'est-à-dire, de sa déformation sous un chargement en fonction du temps. Il existe quatre principaux comportements pouvant être identifiés en fonction de l'amplitude de déformation de l'enrobé et du nombre de cycles de chargement (Figure I.6).

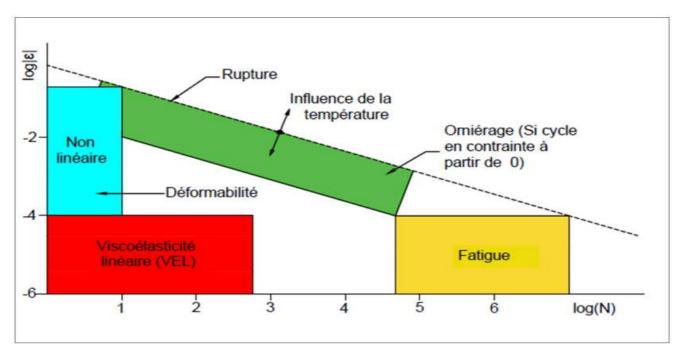


Figure (I.6): Comportement des enrobés bitumineux [4].

comportement non-linéaire : lorsque l'enrobé est soumis à un faible nombre de chargements et à un très faible pourcentage de déformation;

- comportement viscoélastique linéaire : lorsque l'enrobé est soumis à quelques centaines de cycles et un faible pourcentage de déformation (<10<sup>-4</sup>);
- fatigue : lorsque qu'il y a endommagement de l'enrobé suite à des chargements de plusieurs milliers de cycles à de faibles déformations;
- déformations permanentes : lorsqu'il y a des déformations permanentes et irréversibles dans l'enrobé suite à des amplitudes de déformation près de la rupture.

La Figure (I.6) permet donc de fixer un ordre de grandeur des différents domaines de comportement du mélange bitumineux pour une température fixée. Les frontières considérées correspondent bien évidemment à des ordres de grandeur qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et la direction du chemin de sollicitation suivi (compression, cisaillement, ...).

Dans ces conditions, les quatre propriétés mécaniques importantes pour les matériaux traités aux liants hydrocarbonés utilisés dans le domaine des terrassements routiers sont :

- La rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire : VEL)
- > Le comportement en fatigue
- Le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations

- permanentes. Cela constitue donc un phénomène lié aux irréversibilités et aux nonlinéarités déjà existantes dans le domaine des faibles déformations.
- La fissuration et la propagation de fissure au travers de la structure de chaussée. En particulier, le phénomène de fissuration par apparition de contraintes liées aux variations de température (dilatation et/ou contraction thermique) est un aspect important qui introduit un couplage thermique/mécanique[5].

#### I.4.2.1. Comportement viscoélastique linéaire (VEL) :

Dans un enrobé bitumineux, la fréquence de chargement ainsi que la température ont un effet sur son module de rigidité, son module complexe (E\*). Pour bien connaître le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé, il est possible de mesurer expérimentalement son module complexe.

#### I.4.2.2. Module complexe $(E^*)$ :

Le module complexe (E\*) indique la rigidité d'un matériau. Il peut être déterminé avec un essai soumettant l'enrobé bitumineux à des sollicitations sinusoïdales sous différentes fréquences et températures, tout en restant dans le domaine des petites déformations.

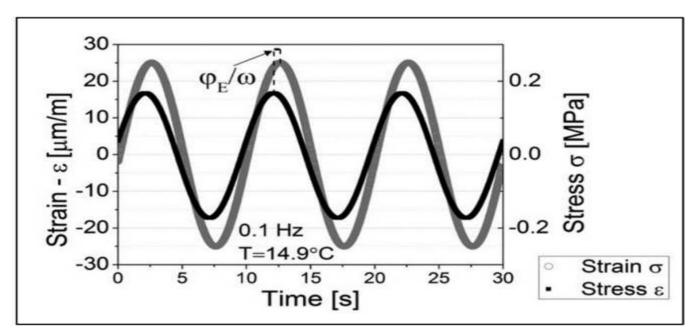
Un matériau réagira différemment aux sollicitations dépendamment de sa rhéologie.

Dans un matériau purement élastique, la déformation due à la contrainte sera instantanée et se conformera à l'équation suivante,  $\epsilon(t) = \epsilon 0 \sin(\omega t)$  ou  $\omega$  exprime la pulsation. Toutefois, dans un matériau viscoélastique il y aura un retard sur la contrainte.

Ce retard est exprimé par l'angle de phase qui peut varier entre  $0^{\circ}$  et  $90^{\circ}$ , l'équation devient donc du même  $\operatorname{coup}(\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi))$ .

Dans un matériau purement élastique, l'angle de phase sera de 0°, tandis que pour un matériau purement visqueux, l'angle sera de 90°.

Pour ce qui est de la contrainte du matériau, elle respecte l'équation  $\sigma(t) = \sigma_0 sin(\omega t)$  en prenant en compte que la déformation succède la contrainte (Figure I.7)[4].



**Figure (I.7) :** Variation de la contrainte et de la déformation pour un matériau viscoélastique linéaire[6].

En établissant les fonctions suivantes,

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_o. e^{i\omega t} \tag{I.1}$$

$$\sigma(t) = \sigma_o. e^{i(Wt - \phi_E)} \tag{I.2}$$

Le module complexe peut être défini sous la forme

$$E^*(t) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)} \tag{I.3}$$

Ce qui mène à l'équation suivante

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} e^{i \sigma_E}(\omega) = |E^*| e^{i \sigma_E}(\omega)$$
 (I.4)

Où

 $E^*$ module complexe;

 $|E^*|$  norme du module complexe; qui peut se calculer avec  $|E^*| = \sqrt{E_1^* + E_2^2}$   $\sigma_0$  amplitude de contrainte;

 $\varepsilon_0$ amplitude de déformation;

ω pulsation  $(2\pi F)$  (rad/s);

 $\phi_E$  angle de phase  $(\phi_E = \omega \cdot t_{lag})$ ;

i partie imaginaire d'un nombre complexe (i =  $\sqrt{-1}$ );

 $t_{lag}$ temps de déphasage exprime par  $t_{lag} = \phi_E/\omega$ 

Le module complexe peut également être défini par l'équation suivante

$$E^* = E_1^2 + E_2^2 \tag{I.5}$$

Où

E1Partie réelle du module complexe, appelée module élastique

E2 Partie imaginaire du module complexe, appelée module de perte

Ces deux composantes peuvent se calculer avec les équations suivantes :

$$E_1 = |E^*| \cos \phi_E \tag{I.6}$$

$$E_2 = |E^*| \sin \phi_E \tag{I.7}$$

La composante E<sub>1</sub> permet de quantifier l'énergie emmagasinée lors du chargement d'un matériau. La composante E<sub>2</sub>, quant à elle, indique l'énergie dissipée lorsqu'il y a un frottement interne lors d'une sollicitation. Lorsque l'éprouvette subit des chargements cycliques, l'énergie dissipée est transmise dans le matériau sous forme de chaleur entre autres et augmente ainsi sa température[7].

#### I.5. Modélisation viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux :

#### I.5.1. Assemblages discrets de ressorts et d'amortisseurs – spectre discret :

Toute combinaison de ressorts et d'amortisseurs constitue un modèle analogique viscoélastique linéaire.

De nombreuses combinaisons particulières sont utilisées pour tenter de décrire le comportement viscoélastique linéaire des matériaux bitumineux [6].

#### **I.5.1.1. Ressort:**



Figure (I.8): Schéma du ressort

onction de fluage (F), fonction de relaxation (R) et module complexe (E\*) du ressort sont respectivement présentés par les formules (2-38) à (2-40):

$$F(t) = \frac{1}{E} \tag{I.8}$$

$$R(t) = E \tag{I.9}$$

$$E^*(\omega) = E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{I.10}$$

#### I.5.1.2. Amortisseur:

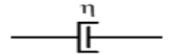


Figure (I.9) : Schéma de l'amortisseur

Fonction de fluage (F), fonction de relaxation (R) et module complexe  $(E^*)$  de l'amortisseur sont respectivement présentés par les formules (I-11) à (I-13):

$$F(t) = \frac{t}{\eta} \tag{I.11}$$

$$R(t) = \eta \delta(t) \tag{I.12}$$

$$E^*(\omega) = j\omega\eta \tag{I13}$$

Où j est le nombre complexe, j2=-1 ;  $\delta(t)$  est la fonction de Dirac qui est exprimée par les expressions :

$$\boldsymbol{\delta}(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0 \\ \mathbf{0}, & t \neq \mathbf{0} \end{cases}$$
 (I.14)

#### I.5.2. Modèle de Maxwell:



Figure (I.10): Schéma du modèle de Maxwell

Fonction de fluage (F), fonction de relaxation (R) et module complexe  $(E^*)$  du modèle de Maxwell sont respectivement présentés par les formules (I-15) à (I-17):

$$F(t) = \frac{1}{E} + \frac{t}{n} \tag{I.15}$$

$$R(t) = Ee^{-\frac{t}{\tau}} \tag{I.16}$$

$$E^*(\omega) = E \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau} \tag{I.17}$$

Où E représente la rigidité (ou le module) du ressort,  $\eta$  est la viscosité de l'amortisseur,  $\tau$  est le temps de relaxation,  $\tau = \eta/E$ , j est le nombre complexe, j2=-1.

#### I.5.3. Modèle de Kelvin-Voigt :

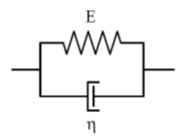


Figure (I.11): Schéma du modèle de Kelvin-Voigt

Fonction de fluage (F), fonction de relaxation (R) et module complexe  $(E^*)$  du modèle de KelvinVoigt sont respectivement présentés par les formules (I-18) à (I-20):

$$F(t) = \frac{1}{F}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$
 (I.18)

$$R(t) = E + \delta(t)\eta \tag{I.19}$$

$$E^*(\omega) = E + j\omega\tau \tag{I.20}$$

Où E représente la rigidité (ou le module) du ressort,  $\eta$  est la viscosité de l'amortisseur,  $\tau$  est le temps de relaxation,  $\tau = \eta/E$ ,  $\delta(t)$  est la fonction « impulsion » de Dirac,  $\delta(t) = \infty$  si t = 0 et  $\delta(t) = 0$  si t = 0

0, j est le nombre complexe,  $j^2=-1$ .

Les deux modèles de Maxwell (liquide viscoélastique) et Kelvin-Voigt (solide viscoélastique) sont bien connus et très simples, cependant, ils ne permettent pas de décrire correctement le comportement des matériaux bitumineux[6].

#### I.5.4. Modèle de Maxwell Généralisé (MG) :

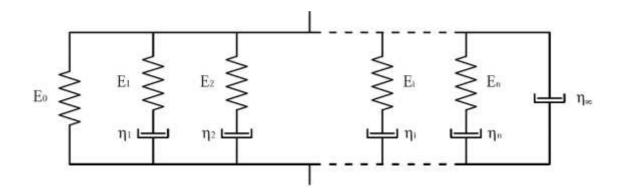


Figure (I.12): Schéma du modèle de Maxwell généralisé

Le modèle de Maxwell Généralisé (MG) est constitué d'un nombre fini n de modèle de Maxwell ressort et/ou d'un amortisseur également placé en parallèle. La fonction de relaxation et le module complexe de ce modèle s'expriment respectivement alors sous les formes suivantes :

$$R(t) = E_0 + \eta_{\infty} \delta(t) + \sum_{i=1}^{n} E_i e^{-\frac{t}{\tau i}}$$
 (I.21)

$$E^*(\omega) = E_0 + j\omega\eta_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i \frac{j\omega\tau_i}{1 + \omega\tau_i}$$
 (I.22)

Où  $E_0$  et  $\eta_\infty$  sont respectivement le module du modèle MG si  $\omega \to 0$  et la viscosité de modèle MG si  $\omega \to \infty$ ,  $E_i$  et  $\eta_i$  représentent respectivement le module du ressort et la viscosité de l'amortisseur du modèle de Maxwell i,  $\tau_i = \eta_i/E_i$ est son temps de relaxation,  $\delta(t)$  est la fonction de Dirac,  $\delta(t) = \infty$  si t = 0 et  $\delta(t) = 0$  si  $t \neq 0$ , j est le nombre complexe,  $j_2 = -1$ 

#### I.5.5. Modèle de Kelvin-Voigt généralisé :

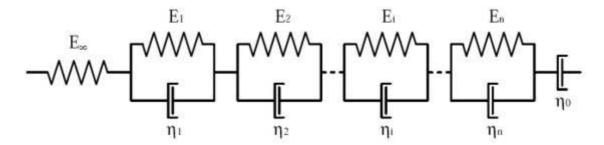


Figure (I.13): Schéma du modèle de Kelvin-Voigt généralisé

Le modèle de **K**elvin-**V**oigt **G**énéralisé (KGV) est constitué d'un nombre fini n de modèles de **K**elvin-**V**oigt (KV) placés en série et éventuellement d'un ressort et/ou d'un amortisseur. Chacun des modèles de KV est caractérisé par le temps de relaxation  $\tau = \eta i/Ei$ . La fonction de fluage et le module complexe de ce modèle s'exprime sous les équations suivantes :

$$F(t) = \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{E_i} (1 - e^{-\frac{t}{\tau i}})$$
 (I.23)

$$E^{*}(\omega) = \left(\frac{1}{E_{\infty}} + \frac{1}{j\omega\eta_{0}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{E_{i} + j\omega\eta_{i}}\right)^{-1}$$
 (I.24)

Où  $E_{\infty}$  et  $\eta_0$  sont respectivement le module du modèle de KVG si  $\omega \to \infty$  et la viscosité de modèle de KVG si  $\omega \to 0$ ,  $E_i$ et  $\eta_i$  représentent respectivement le module du ressort et la viscosité de l'amortisseur du modèle de KV i,  $\tau_i = \eta_i/E_i$ est son temps de relaxation,  $\delta(t)$  est la fonction « impulsion » de Dirac,  $\delta(t) = \infty$  si t = 0 et  $\delta(t) = 0$  si  $t \neq 0$ , j est le nombre complexe,  $j \ge -1$ .

Les modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt généralisés permettent de décrire tout type de comportement viscoélastique linéaire lorsque n tend vers l'infini. Ils permettent de décrire de façon satisfaisante le comportement des enrobés bitumineux pourvu qu'un nombre suffisant de paramètres soit utilisé[4].

#### I.6. Orniérage:

Les déformations permanentes dans une chaussée se traduisent souvent par la formation d'ornières. Ces ornières ont une forme parabolique et se retrouvent principalement dans les pistes de roues d'une chaussée. Elles peuvent provenir du tassement des couches de fondation ,qui cause des ornières à grand rayon, ou encore de la déformation dans la couche d'enrobé bitumineux qui cause plutôt des ornières à faible rayon. Au niveau de la couche d'enrobé bitumineux, les ornières sont plus susceptibles d'évoluer lorsqu'une de ces trois situations est présente soit :

- 1) la température est élevée,
- 2) le poids des véhicules, ainsi que la pression des pneus sont élevés et,
- 3) la vitesse du trafic est lente [4].

Il existe deux types d'ornières qui peuvent se produire sur les enrobés bitumineux soit, les ornières par déformation plastique et les ornières d'usure, comme illustré dans la figure (I.14). On distingue l'orniérage petit rayon qui ne se produisent que dans les couches de surface (concerne que les mélanges bitumineux) et les ornières structurelles provenant de la couche de forme (orniérage grand rayon).

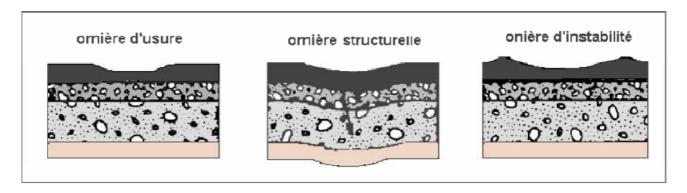
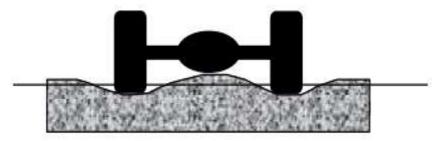


Figure (I.14): Types d'ornières dans les chaussées souples [4]

#### I.6.1.Orniérage petit rayon :

Les ornières à petit rayon se produisent dans les couches de surface de la chaussée sous sollicitations dues au trafic souvent à des températures élevées. D'ailleurs, l'orniérage se produit souvent pendant un été très chaud pour une température d'environ 47°C sous les sollicitations du trafic. Les ornières de fluage sont observées par un déplacement longitudinal ou transversal de matériau bitumineux à volume constant ou une dilatation due aux contraintes normales générées par la charge normale et au cisaillement surfacique induit par des forces tangentielles [7].



**Figure** (**I.15**) : Orniérage des couches bitumineuses de surface[7]

Les modèles conventionnels d'orniérage primaire existant sont souvent dérivés d'une analyse statique sur les déformations élasto-plastiques et les contraintes issues des essais de compression uni-

axiale ou tri-axiale répétées sur des enrobés bitumineux. Pour évaluer le taux d'orniérage pour les chaussées plus ou moins épaisses, Finn et al. ont utilisé les résultats des essais AASHTO en fonction du nombre d'essieux simple équivalents (ESAL)et la contrainte de compression. Ainsi, pour des couches de surface ayant une épaisseur supérieure ou égale à 152 mm le taux d'orniérage par répétition d'essieu est donné par :

$$\log(R) = -1,173 + 0,717 \log d - 0,685(N_{18}) - 0,666 \log(\sigma_c)$$
 (I.25)

et pour des couches de surface ayant une épaisseur inférieur à 152 mm il est donné par :

$$\log(R) = -5,617 + 4,343 \log d - 0,16(N_{18}) - 1,118 \log(\sigma_c)$$
 (I.26)

où d'étant la déflection de la surface de la chaussée (en mm) sous une charge de 40 kN,N18 le nombre d'essieu simple de 18 kN, et c la contrainte de compression à l'interface de la couche d'enrobé bitumineux. Ce modèle a été amélioré par Chen et al. Afin de prendre en compte tous types d'épaisseurs. Aussi, une fonction de transfert a été proposée par AASHTO en 2002 par l'équation (I -27) [1].

$$log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r}\right) = -3,7498 + 0,4262 log(N) + 2,02755 log(T)$$
 (I.27)

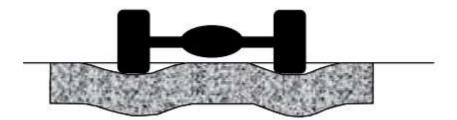
 $où \varepsilon_p$  est la déformation permanente cumulée,  $\varepsilon_r$  la déformation de résilience, N lenombre d'essieu acceptable pour  $\varepsilon_p$  et T la température de la chaussée.

#### I.6.2.Ornières structurelles:

Ce type d'orniérage provient des couches inférieures et est essentiellement dû à une mauvaise conception structurelle[1].

Il est provoqué par une déflection longitudinale suivant :

La déformation verticale sur la surface de la couche de forme est souvent liée aux ornières structurelles dans le cas où la charge appliquée ne dépasse pas la capacité de cisaillement du sol.



**Figure (I.16)** : Orniérage du sol support [7]

Asphalte Institute a proposé en 1982 un modèle d'orniérage basé sur la déformation de la couche de forme (sol) avec un seuil maximum de 12; 5 mm d'ornière décrite par l'équation (I -28) [1].

$$N = 1{,}365 x 10^{-9} (\varepsilon_v)^{-4{,}477}$$
 (I.28)

Où N est le nombre de passage de la charge jusqu'à la rupture et  $\varepsilon_v$  est la déformation verticale maximale (donc de compression) sur la surface de la couche de forme.

#### I.7. Conclusion

Les chaussées souples sont caractérisées par un faible trafic, une mince couche de roulement et une assise en martiaux non lies.

La faible épaisseur de revêtement bitumineux et l'absence de la cohésion dans les couches d'assise conduisent à une faible rigidité structurelle.

En effet, cette dernière dépend étroitement de la rigidité de sol support. Le fort rapport le module d'élasticité de la couche de base et la couche de roulement donne une flexibilité a la structure de la chaussé. Sous l'effet d'une charge roulante le béton bitumineux subit des cycles de traction par flexion a sa base qui conduisent à des fissurations par fatigue.

La déformation des couches de surfaces (ornière) reste la principal dégradation des chaussées souple, et qu'est le résultats des phénomène combiné tel les poids lourds et la température.

# CHAPITRE II: DIMENSIONNEMENT DE CORPS D'UNE CHAUSSEE

### II.1. Introduction:

La conception d'une chaussée souple traite principalement des aspects structurels tels que la sélection des matériaux appropriés, les caractéristiques de la charge, et la détermination de l'épaisseur des couches. Depuis la n des années 1950, les procédures de conception de chaussée ont évolué allant des méthodes empiriques aux méthodes mécaniste empiriques qui incorporent les réponses et le comportement de base d'une chaussée. Cette évolution a été faite grâce à la caractérisation améliorée du trac, des matériaux, des effets de climat, ainsi bien que l'amélioration des capacités de calcul.

### II .2. Méthodes de dimensionnement :

La réalisation des différents types de chaussées passe d'abord par un dimensionnement adéquat. Pour cela différentes méthodes ont été proposées suivant deux approches.

### II .2.1. Approches empiriques :

Les méthodes empiriques sont basées, pour la plupart, sur des essais et des observations effectuées sur des chaussées réelles ou expérimentales. Ces approches empiriques ont apporté de nombreux renseignements sur l'action des charges de trafic et des sollicitations thermiques, sur les propriétés des matériaux constitutifs de la chaussée ainsi que sur le comportement à long terme des structures routières [11]

Parmi les essais basés sur l'approche empirique on distingue ;

- Bates experimental road test, Illinois, 1920;
- Route expérimentale du Maryland, chaussées rigides, 1941;
- WASHO road test, Idaho, 1953;
- AASHTO road test, Illinois, 1958;
- Brampton road test, Ontario, 1970;
- SHRP-LTPP, Amérique du Nord, 1987; Leurs inconvénients;
- elles ne peuvent être appliquées que pour les conditions climatiques et de trafic pour lesquelles elles ont été établies et ne s'appliquent qu'aux matériaux étudiés ;
- ✓ le temps de réponse est très long ;
- ✓ le coût de la réalisation des différents essais est très élevé [8].

### II .2.2. Approche Analytique (théorique) :

Le dimensionnement de toute structure de chaussée consiste à évaluer le niveau de sollicitation et ensuite de le confronter aux paramètres limites des différents matériaux de la chaussée. Les modèles de la mécanique des chaussées permettent d'expliquer le fonctionnement et le

comportement des divers types de structures routières à partir d'une schématisation simple des structures et des charges appliquées. Ils permettent aussi d'évaluer le niveau de sollicitation d'une structure de chaussée. Les modèles doivent donc représenter le plus possible le fonctionnement des structures étudiées.

La plupart des méthodes de calcul de la réponse mécanique de la chaussée sont basées sur des hypothèses simplificatrices :

✓ charge idéalisée ;

✓ comportement linéaire élastique des matériaux ;

✓ couches constituées de matériaux homogènes et isotropes.

On distingue dans cette approche les modèles suivants :

### II .2.2.1. Modèle de Boussinesq (1885) :

Boussinesq considère le sol comme un massif élastique, semi infini. Il suppose en plus que le corps de chaussée en matériau granulaire n'est pas très différent du sol support. La charge q du pneumatique appliquée à la chaussée engendre une contrainte en fonction de la profondeur. Le but est de rechercher à quelle profondeur du sol support la contrainte verticale a été suffisamment diffusée pour ne pas dépasser la contrainte admissible. L'allure du diagramme de contrainte à différentes profondeurs est schématisée sur la figure (II.1).L'expression de la contrainte est :

$$\sigma z = q_0 \left[ 1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right]$$
 (II.1)

où:

 $q_0$ : La pression appliquée par le pneumatique ;

a: Le rayon d'action de la charge;

Z : profondur.

Il reste donc à déterminer la contrainte admissible du sol ainsi que l'épaisseur du corps de chaussée pour laquelle, la contrainte verticale sur le sol-support ne dépasse pas la contrainte admissible[19].

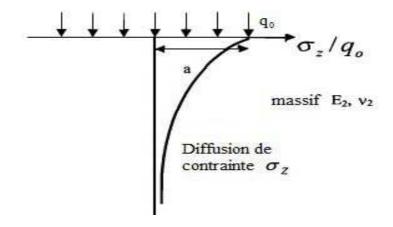


Figure (II.1): Diffusion de la contrainte selon Boussinesq

### II .2.2.2. Modèle bicouche:

Dans le cas d'une faible contrainte sur le sol-support, il peut être coûteux de réaliser la répartition des pressions par l'intermédiaire du corps granulaire ou bien le dimensionnement pour un corps de chaussée granulaire peut mener à une épaisseur forte. Pour l'éviter, les matériaux peuvent être traités aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés. Le liant, avec son aptitude d'augmenter le module d'élasticité de la couche de chaussée, modifie donc son comportement mécanique.

La couche de chaussée fléchit sous la charge ce qui entraine une apparition d'une contrainte de traction par flexion à la base de la chaussée.

Pour le dimensionnement nous devons satisfaire deux critères qui conditionnent son comportement dans le temps ;

 $\sigma_{Z}$ < ( $\sigma_{Z}$ ): fonction de la nature du sol-support et le nombre de cycles;

 $\sigma_T > (\sigma_T)$ : fonction de la nature du matériau et le nombre de cycles [19].

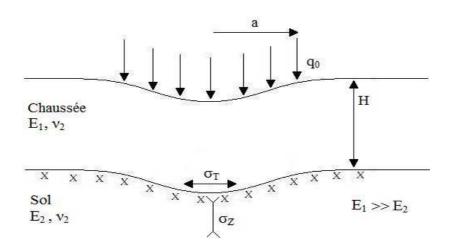


Figure (II.2): Travail en flexion d'une couche liée

### II .2.2.3. Modèle de Hogg (1938):

Le modèle bicouche génère des contraintes verticales et des déplacements qui sont difficiles à résoudre. Pour les déterminer, Hogg a assimilé la chaussée à une plaque mince et a utilisé les hypothèses simplificatrices de Navier ;

- ✓ le plan moyen est confondu avec la fibre neutre ;
- ✓ les sections planes transversales restent planes pendant la déformation ;
- les contraintes normales suivant une direction transversale peuvent être négligées. Les déplacements verticaux W de la fibre neutre satisfont à l'équation de Lagrange qui fournit une première relation entre les deux inconnues W et .

$$D\Delta^2 W = P$$
 ,  $D = \frac{[E_1 H^3]}{12(1+\nu_1^2)}$  (II. 2)

D : facteur de rigidité de la plaque.

W : déplacement verticale de la fibre neutre. P : la somme des pressions verticales.

 $P = \sigma_z - q_0$ : à l'aplomb du cercle de charge et à l'extérieur de ce cercle.

 $\Delta^2$ : le double Laplacien en coordonnées polaires  $[(d^2/dr^2)+1/r(d/dr)]^2$ 

La deuxième relation est obtenue en assimilant les déplacements verticaux de la fibre neutre de la plaque aux déplacements verticaux du massif (dus aux contraintes sur le massif selon Boussinesq).

Pour  $p = \pi$ .  $q_0$ .  $a^2$ : charge par roue,

la contrainte de traction est donnée par la formule de Hogg:

$$\sigma_T = \frac{P}{H^2} \cdot \frac{1+\upsilon}{2\pi} F\left(\frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{H^3}{a^3}\right) \tag{II.3}$$

Le facteur de rigidité relatif de la plaque par rapport à son support  $(E_1/E_2)$ .  $(H^3/\alpha^3)$ 

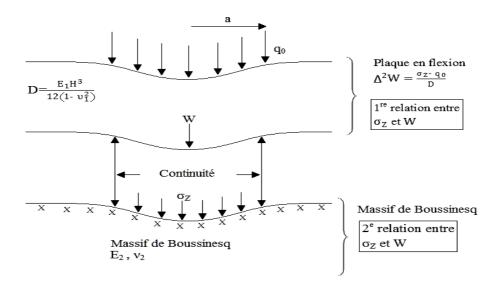


Figure (II.3): Diffusion de la contrainte selon Hogg.

### II .2.2.4. Le modèle de Westergaard (1926) :

Outre l'hypothèse de la plaque utilisée par Hogg, Westergaard considère le sol comme un assemblage de ressorts dont le déplacement vertical en un point est proportionnel à la pression verticale en ce point soit V = K \* W, voir schéma du modèle de calcul[20].

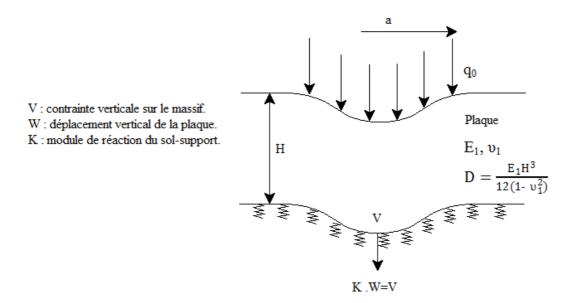


Figure (II.4): Diffusion de la contrainte selon Westergaard

Plus tard Lagrange a proposé la relation :

$$\Delta^2 W(r) = \frac{V(r) - q(r)}{D} \tag{II.4}$$

C'est une équation différentielle du 4<sup>ième</sup> ordre pour laquelle les hypothèses simplificatrices de Hankel ont beaucoup aidé à la résolution[19].

### II .2.2.5. Les modèles multicouches (Burmister 1943) :

Burmister a développé le cas de modèle à n couches. Il s'agit d'un modèle assez puissant puisque ;

- ✓ les couches sont considérées comme des solides élastiques.
- ✓ les interfaces entre couches peuvent être soit collées ou décollées.
- ✓ le cas des charges multiples peut être appliqué en additionnant les effets de charges élémentaires.

Pour évaluer les contraintes et les déplacements dans les couches, Burmister a utilisé la théorie de l'élasticité et l'hypothèse de la symétrie de révolution du chargement qui a beaucoup facilité les calculs.

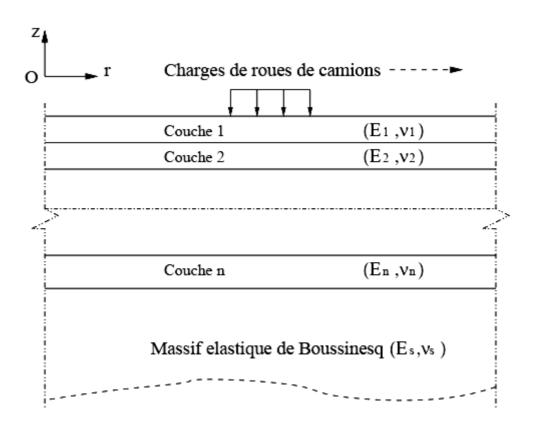


Figure (II.5): Modèle de Burmister [24].

Les transformations de Hankel ont facilité la résolution des équations du problème d'élasticité, en coordonnées cylindriques. Les formules sont généralisées pour n couches. Ce qui devient fastidieux car pour un point donné il faut 4n fonctions en ce point et on déduit les valeurs des

contraintes ( $\sigma_z$ )<sub>i</sub> et des déformations (W)<sub>i</sub>.

C'est avec le développement de l'outil informatique que ce modèle est maintenant plus accessible et est le plus utilisé.

Parmi les logiciels permettant de résoudre ce modèle on cite l'Alizé du LCPC.

### II .3. Facteurs affectant la conception des chaussées flexibles :

De nombreux facteurs affectent la conception des chaussées souples et peuvent être classés en quatre catégories : trafic et chargement, modèles structurels, caractérisation des matériaux et environnement.

### II .3.1. Trafic et chargement :

Le trafic est le facteur le plus important dans la conception de la chaussée. Divers attributs du trafic incluent la pression de contact, la charge sur les roues, la configuration des essieux, les charges mobiles, la charge et les répétitions de charge.

Afin de décrire les influences des facteurs du véhicule sur les dommages à la chaussée, le concept d'un essieu de véhicule de référence est utilisé. La référence est le simple essieu, avec pneus jumelés, chargé à 80KN traditionnellement utilisé par le milieu routier. Le dommage causé par cette référence est appelé une charge équivalente à un seul essieu (ESAL).

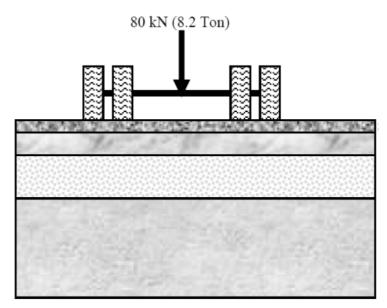


Figure (II.6): Présentation de la charge équivalente à un seul essieu (ESAL).

\* **Pression de contact :** La pression des pneus est un facteur important car elle détermine la zone de contact et la pression de contact entre la roue et la surface de la chaussée. Même si la forme de la zone de contact est elliptique, par souci de simplicité d'analyse, une zone circulaire est souvent

considérée.

\*Charge de roue : le prochain facteur important est la charge de roue qui détermine la profondeur de la chaussée requise pour garantir que les contraintes dans le sol de fondation sont dans les limites admissibles.

\*Configuration des roues : la configuration des roues affecte la répartition des contraintes et la déflexion à l'intérieur d'une chaussée. De nombreux véhicules utilitaires ont une configuration de roues jumelées et supérieures sur l'essieu arrière, ce qui garantit une pression de contact dans les limites autorisées. La pratique normale consiste à convertir une roue jumelée en une charge équivalente à une seule roue, de sorte que l'analyse est simplifiée.

\* Configuration des essieux : La capacité de charge du véhicule utilitaire est encore améliorée par l'introduction de plusieurs essieux. La capacité de charge du véhicule utilitaire est encore améliorée par l'introduction de plusieurs essieux.

Les fabricants de véhicules utilisent différents types de groupes d'essieux dans les véhicules lourds. Néanmoins, une petite gamme de groupes d'essieux a été envisagée dans les recherches antérieures. La charge par essieu simple avec pneus jumelés a été utilisée dans les travaux de Tayabji et Colley (1983), Packard et Tayabji (1983 et 1985), Smith et al. (1990), Yu et al. (1997) et AASHTO (2003). Gillespie et al. (1992) ont utilisé la charge équivalente à un essieu (ESAL) basée sur les caractéristiques de charge dérivées de pneus jumelés à un essieu. L'effet de la charge à l'essieu en tandem sur la réponse des chaussées en béton a été étudié par Tayabji et Colley (1983), Packard et Tayabji (1983 et 1985) et AASHTO (2003). La charge par essieu triple a été utilisée dans les travaux de Packard et Tayabji (1985) et AASHTO (2003) [20].

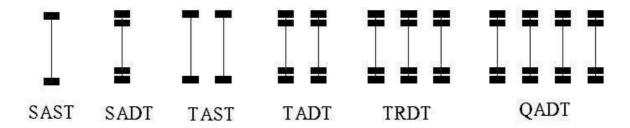


Figure (II.7): Types de groupes d'essieux [20]

Austroads (2004) a adopté la méthode PCA pour convenir aux conditions australiennes. Par conséquent, la méthode PCA a été étendue pour prendre en compte différents types de groupes d'essieux, y compris le pneu simple à essieu simple (SAST: Single Axle Single Tyre), le pneu simple à essieu simple (SADT: Single Axle Dual Tyre), le pneu simple à essieu tandem (TAST: Tandem

Axle Single Tyre), le pneu double à essieu tandem (TADT: Tandem Axle Dual Tyre), le triple essieu double Pneu (TRDT: Triple Axle Dual Tyre) et double essieu quadruple (QADT: Quad Axle Dual Tyre). La figure (II.7) montre une configuration schématique des groupes d'essieux mentionnés cidessus.

\*Charges en mouvement : Les dommages à la chaussée sont beaucoup plus importants si le véhicule se déplace à vitesse lente. Des études montrent que lorsque la vitesse passe de 2 km/h à 24 km/h, les contraintes et la déflexion sont réduites de 40 % [Tom V. Mathew et K. V. Krishna Rao].

La vitesse est un paramètre important. Plus un véhicule circule rapidement moins le temps d'application de la charge sur un point donné de la chaussée sera long. L'agressivité d'un pneu va alors varier puisque les contraintes issues de l'adhérence au niveau de la surface ou la déformation en fond de couche ne sera pas symétrique par rapport au pneu. En 2002 Raj V. Siddharthan, à mis en avant que les déformations mesurées vont diminuer avec la vitesse (Figure II.8) [21].

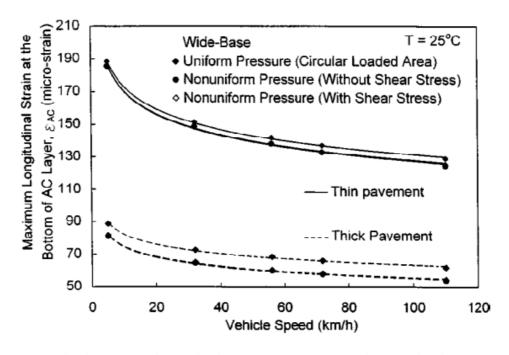


Figure (II.8): Variation des déformations longitudinales pour un camion équipé de pneu à bande large [11]

\*Répétition des charges: L'influence du trafic sur la chaussée n'est pas limitée à l'amplitude de la charge sur les roues mais également sur la fréquence des applications de charge. Chaque application de charge provoque une certaine déformation et la déformation totale est la somme de toutes ces déformations individuelles. Bien que la déformation de la chaussée due à l'application d'une seule charge soit très faible, l'effet cumulatif du nombre de répétitions de charge est significatif [21].

### II .3.2. Modèles structurels :

Les modèles structuraux ont diverses approches d'analyse pour déterminer les réponses de la chaussée

(contraintes, déformations et déflexions) à divers endroits dans une chaussée en raison de l'application de la charge des roues. Les modèles structurels les plus courants sont les modèles élastiques en couches linéaires, élastiques non linéaires et viscoélastiques.

### II .4. Largeur et espace entre les pneus jumelés :

Lee et Carpenter (2001) ont noté que Packard et Tayabji (1985) ont supposé que la distance entre les centres des pneus jumelés et la largeur de l'essieu était respectivement de 305 mm et 1829 mm. Kim et al. (2002) considéraient ces distances comme étant de 330 mm et 1880 mm alors que Hiller et Roesler (2002) les supposaient respectivement de 340 mm et 1850 mm. AASHTO (2003) a également considéré une distance de 305 mm entre les centres des pneus jumelés mais a augmenté la largeur de l'essieu à 2134 mm. Austroads (2004b) recommande 330 mm et 1800 mm pour la distance entre les centres des roues jumelées et la largeur de l'essieu, respectivement. La figure (II.9)résume les variations de la largeur et de la distance entre les centres des pneus jumelés selon diverses sources [11].

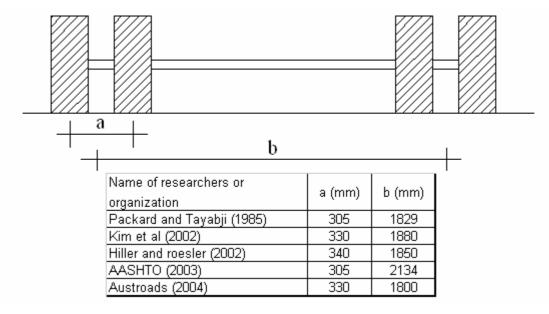


Figure (II.9): Coupe transversale d'une SADT typique[11]

### II.5. Contact pneu-chaussée :

Outre la structure et les matériaux, la performance et la durée de vie des chaussées en service sont énormément influencées par le chargement mécanique et thermique. Les principales charges mécaniques sont provoquées par les véhicules et transmises à la surface de la chaussée par les pneus.

### II.5.1. Modélisation de la charge du pneu :

### a)Surface de contact :

La surface de contact est un paramètre important pour l'analyse du comportement des chaussées. Pour la majorité des analyses, la forme de l'empreinte du pneu est supposée circulaire (Park et al. 2005). Mais, en réalité, elle est plus près d'un rectangle que d'un cercle. Weissman et al. (1999) ont confirmé que l'empreinte est proche de la forme rectangulaire indépendamment du type de pneu. Par contre, Luo (2005) a montré que la forme de l'empreinte évolue de la forme rectangulaire avec un pneu simple à une forme ovale pour un pneu super single.

Bien que les chercheurs aient envisagé une interface rectangulaire pneu-chaussée, diverses dimensions de l'empreinte des pneus ont été utilisées. Si la zone de contact pneu-chaussée est définie comme largeur × longueur où largeur est la dimension normale à la direction du trafic (Fig. II.10), Packard et Tayabji (1985) ont considéré une forme rectangulaire de contact avec les pneus de **178** mm × **254** mm. Handson et Seeds (1988) ont montré que la largeur et la longueur de l'empreinte d'un pneu dans un pneu **11R24.5** sont respectivement de **196** mm et **250** mm. Gillespie et al. (1992) ont préféré utiliser une forme carrée de **203** mm × **203** mm pour les pneus jumelés et une forme rectangulaire de **203** mm × 229 mm pour les pneus simples alors que Kim et al. (2002) ont utilisé une forme rectangulaire de **203** mm × **178** mm [22].

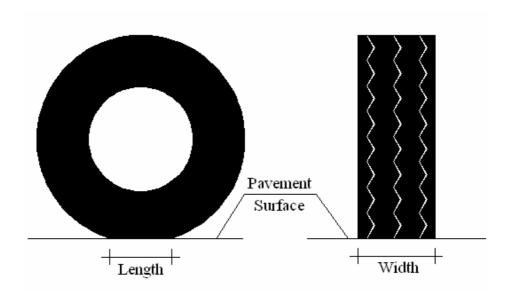


Figure (II.10): Longueur et largeur de la zone de contact pneu-chaussée [22]

Blab (1999) a confirmé que l'utilisation d'une géométrie circulaire de l'empreinte est insuffisante. La figure (II.11)illustre la section de la surface de contact équivalente à un rectangle, ce qui simplifie la forme de l'empreinte réelle. L'équation suivante (Huang, 1993)

est utilisée pour déterminer les dimensions du rectangle [23] :

$$A_c = \pi(0,3L)^2 + (0,4L)(0,6L) = 0,5227L^2$$
 (II.5)

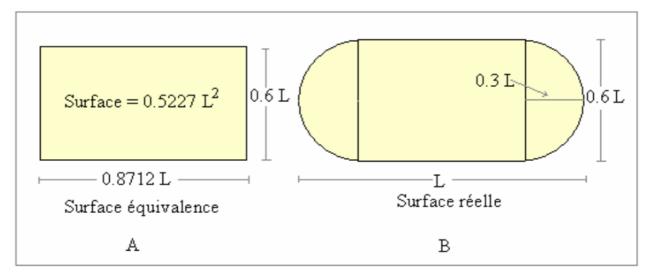


Figure (II.11): Simplification de la surface de contact d'un pneu [23]

Le ratio largeur/longueur de l'empreinte est influencé par le type de pneu. Il y a un certain changement de la largeur de l'empreinte du pneu, mais ceci est modéré en comparaison avec le changement de la longueur (excepté les pneus légèrement chargés ou les pneus excessivement gonflés). Les données collectées par Michelin (1997) montrent que la section de l'empreinte du pneu super single est plus grande dans la direction transversale que dans la direction longitudinale, contrairement à ce qui est observé pour un pneu jumeau.

Comme on le voit dans les tableaux (II.1)et (II.2), on remarque que les dimensions de l'aire de contact dépendent du type de pneumatique, de la charge et de la pression de gonflage [24].

Tire	Maximum	Inflation	Maximum	Net contact	Average
	width	pressure	load	area	vertical contact
	(in)	(psi)	(lbs)	(in <sup>2</sup> )	pressure (psi)
385/65R22.5	15.3	120	9,370	66.3	128
425/65R22.5	16.6	120	11,000	71.4	119
445/65R22.5	17.5	120	12,300		

**Tableau (II-1)**: Surface de contact des pneus à base large fabriqués par Goodyear [24]

Tire	Width	Length	Ratio	Net contact	Maximum	Inflation
	(in)	(in)	(width:length)	area (in²)	load (lbs)	pressure
						(psi)
445/65R19.5	13.1	10.2	1:0.78	81.0	10,250	110
385/65R22.5	11.1	9.4	1:0.85	65.9	9,370	125
425/65R22.5	12.0	10.2	1:0.85	71.3	11,400	125
445/65R22.5	15.0	11.3	1:0.75	85.3	12,300	120
445/65R22.5	13.1	10.8	1:0.82	81.7	12,300	125

**Tableau** (II.2): Surface de contact des pneus à base large fabriqués par Michelin [24]

### b)Contrainte de contact :

La déformation permanente est liée à la pression réelle de contact de l'empreinte. Il est donc nécessaire de bien déterminer la contrainte de contact du pneu. Blab (1999) note que la pression moyenne de contact dépend de trois paramètres : le type de pneu, la charge appliquée et la pression de gonflage.

### II.5.2.Charge/essieu:

La figure (II.11) illustre l'influence de la charge/essieu sur le développement de l'orniérage 800 kPa pour un pneu super single (pression de gonflage de à 30°C). On note que l'orniérage croit avec l'augmentation cette charge. L'augmentation de la charge de 8 à 11,5 tonnes (43%) à une pression de gonflage de 800 kPa fait augmenter l'orniérage de 20%. Perret et al. (2003) montrent que la même augmentation de la charge/essieu fait augmenter la déformation longitudinale de 28% (à 30°C).

### II.5.3. Type de pneu :

On peut classer les pneus utilisés en deux principaux groupes, à savoir les pneus jumeaux et les pneus super single .Les figures (II.12) a et (II.13) b montrent ces pneus [22].



Figure( II.12) a : Pneu jumeau (Michelin 295/80R22) [22].



*Figure*( *II.13*) *b* : *Pneu super single* (*Michelin 385/65R22.5*) [22].

La figure (II.14) compare l'orniérage pour les deux types de pneu ; un pneu jumeau et un pneu super single (une charge/essieu de 11,5 tonnes et une pression de gonflage de 800 kPa, à 50°C). Les résultats numériques montrent que l'orniérage avec un pneu jumeau est moins important que celui avec un pneu super single. On constate que la différence maximale de profondeur est de 13%, ceci est en accord avec les résultats de Bonaquist (1992) qui a montré que le ratio de l'orniérage avec un pneu super single est de 10 à 50% plus élevé que celui obtenu avec le pneu jumeau. Les résultats expérimentaux (Perret et al. 2001, 2003) montrent également que la déformation longitudinale en dessous de la couche de surface est plus importante avec le pneu super single (il est de 13% de plus avec le pneu super single). Ceci est dû au fait que la surface de contact

avec le pneu super single est plus faible, à pression égale, que celle avec le pneu jumeau. Le type de pneu a aussi une influence sur la forme de l'orniérage [12]. On observe l'existence de bourrelet entre et à l'extérieur du pneu jumeau alors qu'avec le pneu super single, on observe uniquement un bourrelet à l'extérieur du pneu figure (II.14).

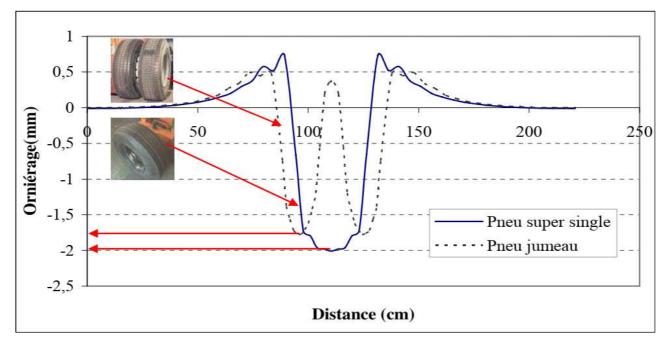


Figure (II.14): Influence du type de pneu sur la forme de l'orniérage [12]

### II.5.4. Influence de la vitesse de circulation :

La diminution de la vitesse de circulation fait augmenter le temps de chargement et par conséquence induit une augmentation de l'orniérage. La figure (II.15) présente l'influence de la vitesse de circulation sur la profondeur de l'orniérage. Les résultats numériques montrent que l'orniérage augmente avec la diminution de la vitesse. Pour les zones à faible vitesse (intersections routières et zone de stationnement), on s'attend à une forte augmentation de l'orniérage. A titre d'exemple, l'orniérage augmente de 100% quand la vitesse décroit de 60 à 10km/h [22].

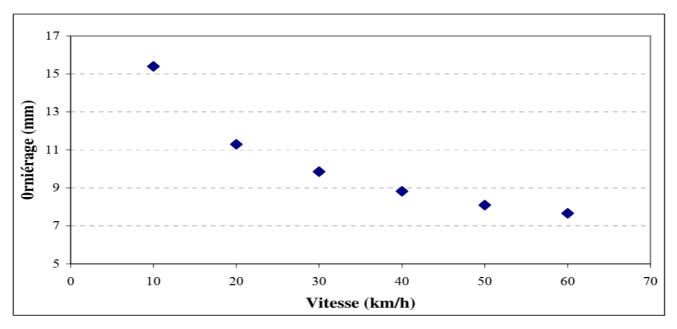


Figure (II.15): Influence de la vitesse de circulation sur l'orniérage [22].

### II.5.5. Influence de la température :

La figure (II.16).présente l'influence de la température sur l'orniérage. On constate que l'orniérage se développe d'une manière très rapide pour les températures élevées (Cette constatation a été confirmée par Lytton, 1993). L'augmentation de la température de 30 à 40°C fait augmenter l'orniérage de 260%.

La température influence également la forme de l'orniérage.

On constate que le bourrelet croit avec l'augmentation de la température.

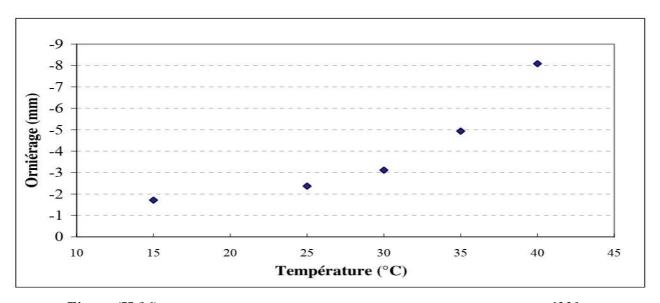


Figure (II.16): Influence de la température sur le développement de l'orniérage [22].

### II.6. Analyse dynamique:

Un phénomène d'origine dynamique se caractérise par une sollicitation variant à la fois dans le temps et dans l'espace, dans lequel les forces d'inertie, produit de la masse par l'accélération, jouent un rôle significatif dans la réponse.

Les actions agissant sur les structures peuvent être classées en sollicitations déterministes et aléatoires, suivant le degré de connaissance de celles-ci, et pour les sollicitations déterministes en actions périodiques, impulsives ou entretenues suivant leur forme de variation dans le temps.

### II .6.1. chargement déterministe :

Si le chargement appliqué est parfaitement défini par sa variation temporelle et spatiale, le chargement est qualifié de déterministe. Un tel chargement peut être :

i) Périodique si le diagramme de chargement se reproduit à l'identique au bout d'une durée T, appelée période de la sollicitation.

Parmi les chargements périodiques, on distinguera les chargements harmoniques et les chargements anharmoniques [26].

Un chargement harmonique est typiquement celui engendré par une machine tournante (figure II.17).. La sollicitation est définie par son amplitude A, et sa pulsation  $\omega$ . Elle est décrite par une fonction sinusoïdale :

$$y(t) = a \sin(\omega t) \tag{II.6}$$

Il est souvent pratique de définir les sollicitations harmoniques sous la forme d'une fonction complexe:

$$y(t) = \rho e^{i\omega t} \tag{II.7}$$

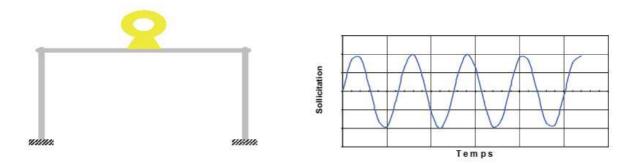


Figure (II.17): Chargement harmonique[16]

Le chargement peut être également périodique, sans être harmonique; on le qualifiera d'anharmonique. Ce type de chargement est celui engendré, par exemple, par un propulseur de navire (figure II.18).

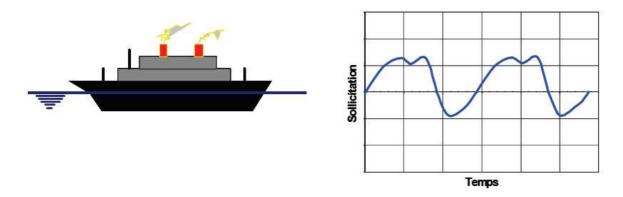


Figure (II.18): Chargement périodique anharmonique [26]

ii) non périodique, de type impulsif ou entretenu; le chargement ne se reproduit pas à l'identique après un intervalle de temps T.

Le chargement impulsif est caractérisé par une sollicitation de faible durée totale, telle celle induite par le front d'une onde de choc heurtant la structure (figure II.19).

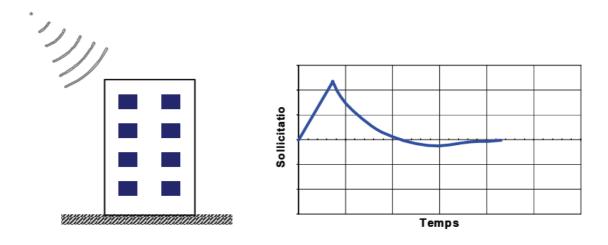


figure (II.19): Chargement impulsif

Le chargement entretenu peut être défini comme le chargement résultant d'une succession d'impulsions. C'est typiquement le cas d'une sollicitation sismique si l'accélération du sol est connue de façon déterministe (figure II.20)[26].

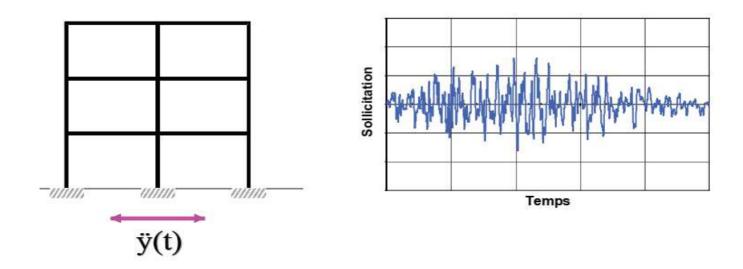


Figure (II.20): Sollicitation entretenue [26]

### II.6. 2.chargement aléatoire :

Beaucoup des chargements sollicitant les structures de Génie Civil ne peuvent être définis de façon déterministe par une équation du type (II.6).

$$Y(t) = f(t) \tag{II.8}$$

Ils ne sont généralement connus que par leur valeur moyenne. Il s'agit typiquement des mouvements vibratoires engendrés par le trafic ferroviaire ou routier (figure II.21)[26]

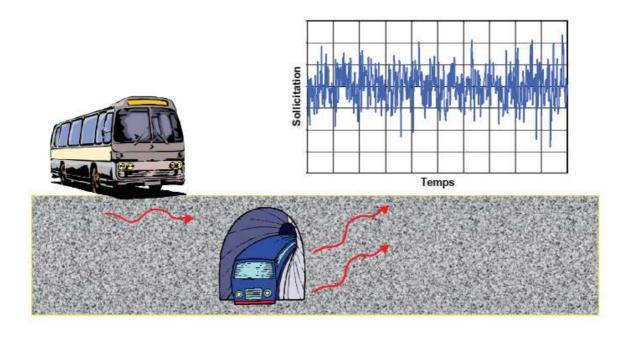


Figure (II.21): Chargement aléatoire [26].

### II.6.3. Analyse en dynamique des chaussées :

Dans la littérature, on note que les réponses dynamiques structurelles ou les implications dynamiques dépendent du rapport de la fréquence de chargement externe à la fréquence naturelle de la structure. La gamme de la fréquence naturelle est de 6 à 14 Hz pour les chaussées souples et de 20 à 58 Hz pour les chaussées rigides (Uddin et Garza; Darestani et al.). Gillespie et al. ont constaté que la fréquence de chargement des poids lourds était aux environs de 4:6 Hz à une vitesse de 58 km/h et de 6:5 Hz à 82 km/h. Ainsi, une analyse dynamique peut être nécessaire pour déterminer les réponses des chaussées [17].

D'après AUSSEDAT (1977), la fréquence de chargement doit être estimée à partir de la vitesse des poids lourds. Bien que la relation soit fonction de la profondeur dans la structure et de la rigidité de cette dernière, on peut, en première approximation, estimer que :

$$f_{Hz} = \frac{V_{km/h}}{6} \tag{II.9}$$

Donc si la vitesse des poids lourds est de 60 km/h, la fréquence de la sollicitation dans les couches de la structure est de 10 Hz [28].

### II .7. conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes modèles proposées pour modéliser le corps de chaussée (approche empirique et approche analytique). La limitation de ces modèles est due aux hypothèses simplificatrices considérées pour faciliter les calculs et la résolution des équations. Cependant une modélisation réaliste nécessite la prise en compte des non-linéarités physiques des matériaux et l'identification des mécanismes de rupture liés à l'accumulation des déformations plastiques et à la fatigue des matériaux.

## CHAPITRE III MODELISATION NUMERIQUE SOUS ANSYS

### 1. Introduction:

Une analyse de structure permet de prédire la réponse d'un milieu (solide ou fluide) soumis à des conditions imposées par l'environnement externe (force, déplacement, flux thermique,...). Le but d'une analyse structurale est de déterminer les contraintes et déformations d'un système ou un composant auquel on applique un chargement, cela à partir des déplacements {u} créés par ce chargement {F}. Cette prédiction est basée sur la satisfaction de quelques équations fondamentales (équation d'équilibre mécanique, équation de la chaleur, loi de comportement...)[19].

Le logiciel ANSYS, dans sa version ANSYS Mechanical ou Multiphysics, permet une gamme complète d'analyses structurales. Ainsi ANSYS gère trois types principaux d'analyse structurale mécaniques, auxquelles il faut ajouter les analyses de chargement thermiques , et les analyses des réponses propres de la structure (flambement et modes de résonnance propres en particulier).

La présente modélisation est la continuité du travail déjà fait en 2019-2020 du projet de fin d'étude de Bouziane Karim intitulé: la modélisation de l'effet de la température et de la charge de trafic sur les performances en ornières d'une chaussée flexible. avec changement du chargement statique par un chargement dynamique transitoire.

### III.2. Analyse dynamique:

Il existe trois types d'analyse dynamique couramment utilisés dans ANSYS :

- (i) analyse modale,
- (ii) analyse harmonique et
- (iii) analyse transitoire.

Les résultats liés à ces types d'analyses peuvent être consultés dans les deux post processeurs (Post processeur Général et Post processeur Time History). Le post processeur général est utilisé pour examiner les résultats sur l'ensemble du modèle à des moments ou à des fréquences spécifiques, tandis que le post processeur d'historique temporel permet à l'utilisateur d'examiner les résultats à des nœuds spécifiques du modèle sur toute la plage de temps ou de fréquence [29].

### III.2.1 Analyse modale:

Si la vibration structurelle est préoccupante **en l'absence de charges externes** dépendantes du temps, une analyse modale est effectuée. Les fréquences structurelles n'étant pas connues a priori, les équations d'équilibre par éléments finis pour ce type d'analyse impliquent la résolution d'équations algébriques homogènes dont les valeurs propres correspondent aux fréquences, et les vecteurs propres représentent

ANSYS:

les modes de vibration. Les étapes suivantes sont utilisées dans une analyse modale typique dans

Construisez le modèle.

Appliquer des charges et obtenir la solution.

Développez les modes.

Vérifiez les résultats.

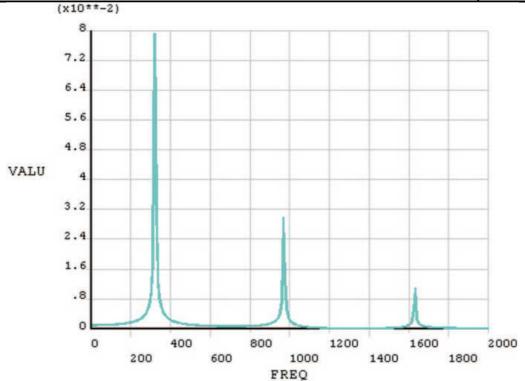
Dans certains cas, surtout si le modèle dispose d'un grand nombre de degrés de liberté, il est avantageux de définir des Master Degrees of Free dom (MDOF). Cette procédure condense les matrices complètes décrivant la structure dans une taille plus petite, réduisant ainsi considérablement le coût de calcul. Les seules conditions aux limites autorisées dans l'analyse modale sont des déplacements nuls. Toutes les contraintes/charges non nulles sont ignorées dans l'analyse. Une fois l'analyse modale terminée, la solution est étendue pour trouver des résultats liés à la structure complète, et pas seulement au MDOF. Les résultats incluent les fréquences naturelles, les déformées modales et les champs de contraintes paramétriques (relatifs) correspondants.

### III.2.2 Analyse harmonique:

Lorsqu'une structure est soumise à un chargement cyclique, la réponse résultante devrait également être cyclique. ANSYS offre à l'utilisateur la possibilité de résoudre cette classe de problèmes grâce à l'option d'analyse harmonique. Les restrictions sur une analyse harmonique sont : Toutes les charges doivent être des fonctions sinusoïdales du temps. Toutes les charges doivent avoir la même fréquence. La structure doit présenter un comportement élastique linéaire (pas de non-linéarités géométriques et matérielles). Les charges sinusoïdales sont spécifiées par les paramètres amplitude, angle de phase et plage de fréquence de forçage. L'amplitude est la valeur de crête de la charge et l'angle de phase est le décalage temporel entre plusieurs charges déphasées les unes par rapport aux autres. Sur le plan complexe, c'est l'angle mesuré par rapport à l'axe réel. Enfin, la plage de fréquence de forçage est la plage de fréquence de la charge harmonique (en cycles/temps) [29].

### III.2.3 Analyse transitoire:

Les problèmes d'ingénierie pratiques ayant un chargement transitoire non cyclique peuvent être résolus à l'aide de l'analyse transitoire dans ANSYS. En règle générale, les étapes suivantes sont utilisées pour une analyse transitoire :



Figure(III.1): Amplitudes du déplacement au nœud milieu en fonction de la fréquence sous chargement harmonique [28]

Construisez le modèle.

Spécifiez les conditions initiales.

Spécifiez les contrôles de solution.

Appliquer des charges.

Écrire le fichier d'étape de chargement.

Appliquez/modifiez les charges et les contrôles de solution pour les prochaines étapes de chargement et écrivez le(s) fichier(s) d'étape de chargement. Obtenez la solution de LoadStep Files. Vérifiez les résultats. Les contrôles de solution sont spécifiés à l'aide de la boîte de dialogue Contrôles de solution, accessible via le chemin de menu suivant :

### Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'nControls

Il y a cinq onglets dans la boîte de dialogue Contrôles de solution. Les deux premiers onglets, Basique et Transitoire, sont suffisants pour la plupart des analyses transitoires. L'onglet De base contient des options pour spécifier la géométrie non linéaire (grande déformation), le temps à la fin de l'étape de charge, les nombres et tailles d'étape et de sous-étape de charge, le pas de temps automatique et la quantité et la fréquence des données de résultats à sauvegarder. L'onglet Transitoire comporte des options liées à l'intégration temporelle et aux spécifications d'amortissement [29].

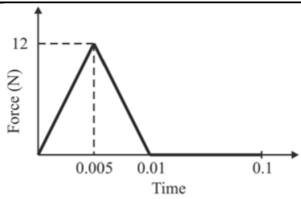


Figure (III.2): Time-dependent loading on the bracket [28]

### III.3. Modélisation Thermo-mécanique de la plaque FGM:

La présente modélisation se fait essentielle par une modélisation structurelle (dynamique transitoire), mais avec fixation du chargement et changement de la caractéristique mécanique (module de Youg et coefficient de Poisson) de la couche de roulement en béton bitumineux (BB) et la couche de base en grave bitumineux (GB) avec le changement de la température.

Température	Module de Young E (Mpa)				Coefficient	Poids
(C°)	20	30	40 45 de poisson spécif		spécifique	
					v	(Kg/m <sup>3</sup> )
BB	3600	1300	1000	850	0.35	2350
GB1	5000	2000	800	350	0.35	2250

Tableau (III.1): Caractéristiques mécanique et physique des enrobés bitumineux.

Les présente données (BB, GB, GNT) sont les même données présentés dans le logiciel ALIZ-LCPC.

	Module de Young E	Coefficient de	Poids spécifique
	(Mpa)	poisson	(Kg/m <sup>3</sup> )
		v	
Grave non traité	500	0.25	1700
(GNT)			
Sol support	50	0.25	1600

Tableau(III.2): Caractéristiques mécanique et physique du GNT et sol support

Après le choix de la préférence pour une étude structurel, on détermine le type d'élément, et qui sera un élément solide de type SOLID186 avec 20 nœuds.

### III.3. 1. Description de l'élément solide (SOLID186):

SOLID278 Thermal Solid convient à la modélisation de la conduction thermique solide 3-D générale. Il permet des dégénérescences prismatiques et tétraédriques lorsqu'il est utilisé dans des régions irrégulières. SOLID278 est conçu pour être un élément compagnon pour SOLID185.

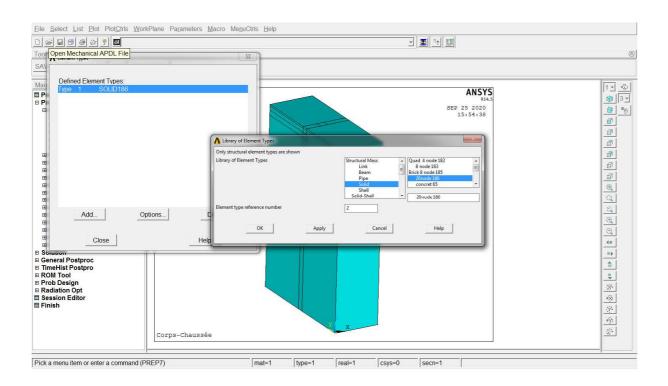


Figure (III.3):: Définir le type d'élément SOLID186

SOLID186 est un élément solide 3-D d'ordre supérieur à 20 nœuds qui présente un comportement de déplacement quadratique.

L'élément est défini par 20 nœuds ayant trois degrés de liberté par nœud : des translations dans les directions nodales x, y et z. L'élément prend en charge la plasticité, l'hyper élasticité, le fluage, la rigidification sous contrainte, une grande déformation et de grandes capacités de déformation. Il a également une capacité de formulation mixte pour simuler les déformations de matériaux élasto plastiques presque incompressibles et de matériaux hyper élastiques totalement incompressibles.

La géométrie, les emplacements des nœuds et le système de coordonnées des éléments pour cet élément sont illustrés dans la Figure(III.4) [29] :

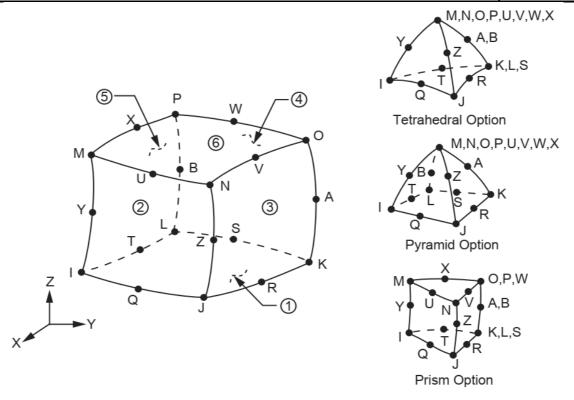


Figure (III.4): Géométrie solide structurelle homogène SOLID186 [20]

### III.3.2. Les Dimensions et le Maillage:

La dimension du corps de chaussée modéliser est montré dans les figure(III.5), les dimensions de la chaussée est :(a=3.6 m, b=5 m, et h=5 m). L'épaisseur des différentes couches du corps de chaussée est comme suit (figure III.6.7).

- Couche de roulement en béton bitumineux (BB) de 7 cm
- Couche de Base en grave bitume (GB) de 15 cm
- Couche de fondation en grave non traité (GNT) de 20 cm
- Sol support infinie de 458 cm

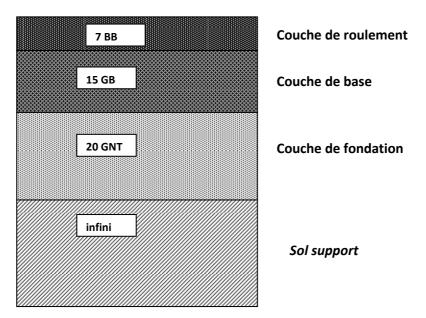
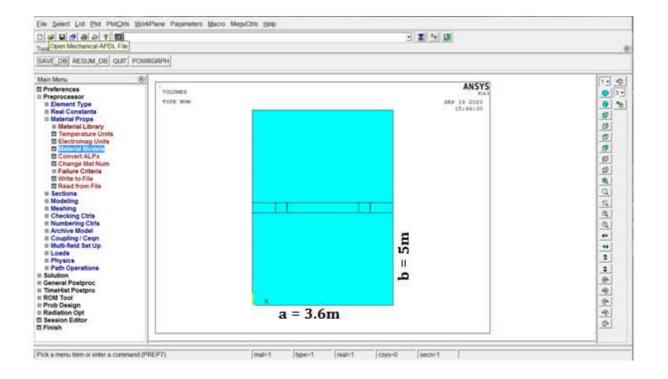
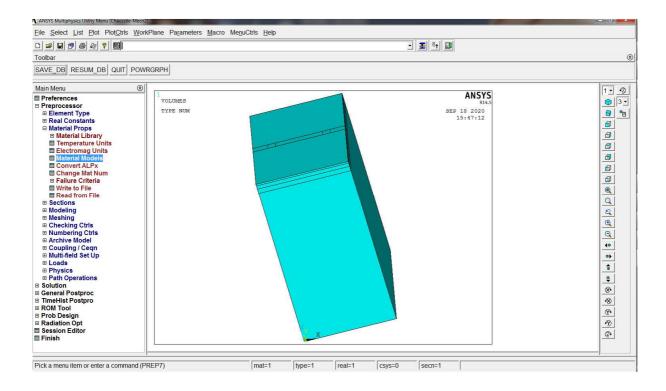


Figure (III.5): Différents couches du corps de chaussée

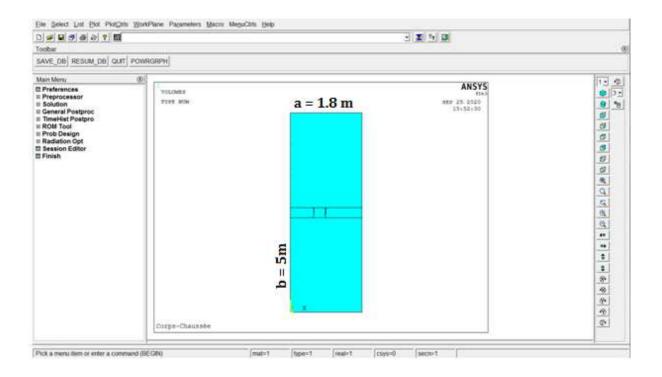


Figure(III.6) : Dimensions en plan de la chaussée

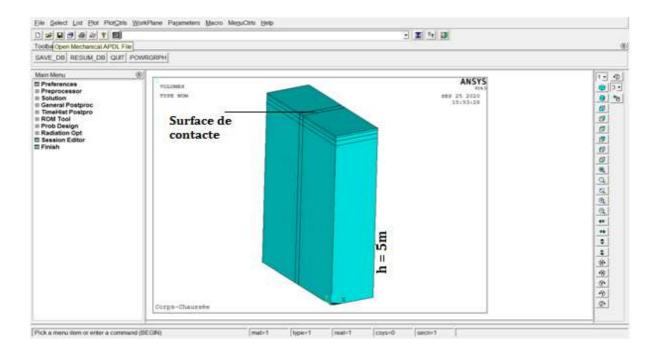


Figure(III.7): Vue 3D du corps de chaussée

Pour minimisé le temps de calcul et à cause de la symétrie en modélisé la moitie de l'essieu c'est-àdire étudier les déformations pour un seul pneu.



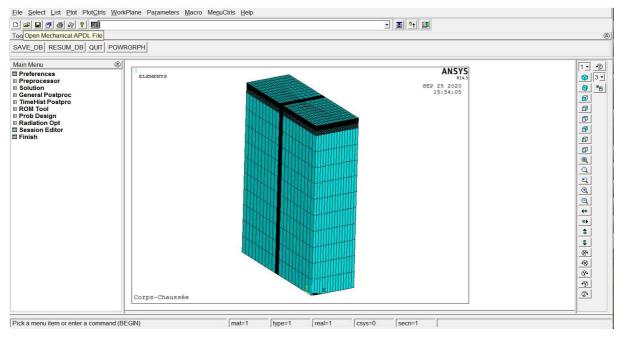
Figure(III.8): Dimension en plan de la moitie de la chaussée



Figure(III.9): Vue 3D de la moitie de la chaussée

Pour cette modélisation nous avons choisis des pneus super simples (425 /65R22.5), la surface de contacte nette suivant le tableau de Michelin (voir chapitre II) est de Ac =71.3 in<sup>2</sup>.

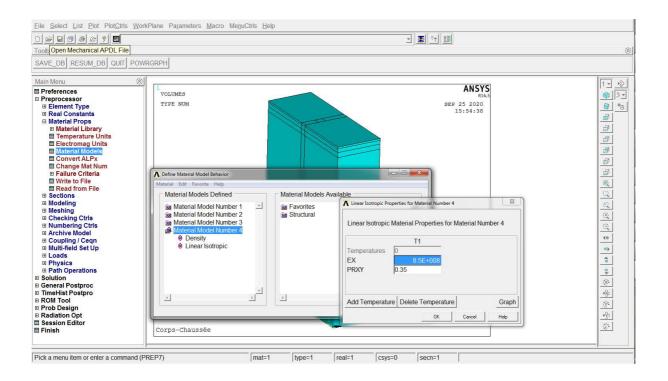
Alors L=11.68 in = 296.67 mm,avec le rapport largeur / longueur (1: 0,85) qui convient pour le pneu super simple (425 /65R22.5)



Figure(III.10): Maillage du modèle

### III.3.3. Matériel Model:

Les valeurs des caractéristiques mécaniques sont introduites en APDL, et cela pour chaque couche du corps de chaussée, avec le changement des données de la couche de roulement en béton bitumineux et la couche de base en grave bitumineuse chaque fois qu'on admet le changement de la température (T=20 C°, T=30C°, et T=45C°). (Voir figure III.11).

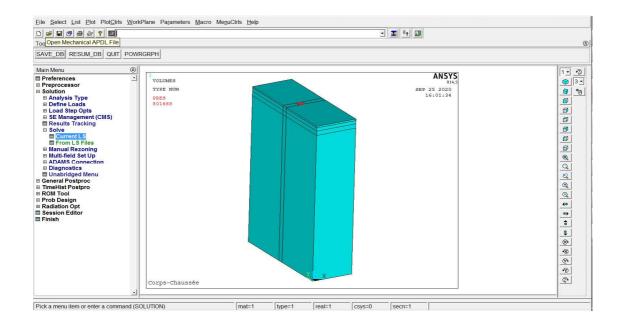


Figure(III.11): Définir le modèle de comportement des matériaux et les valeurs

Les sous couches (épaisseurs) du corps de chaussée est considéré comme un matériau isotrope et homogène. On introduit pour chaque couche les propriétés structurel (E: module de Young, v: coefficient de poisson, et ρ: la densité).

### III.4. Conditions aux limites et chargement:

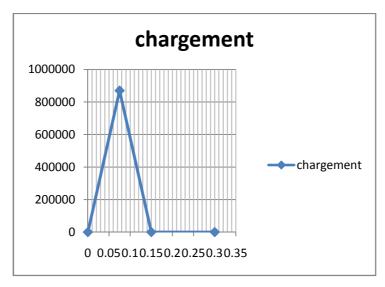
Le modèle de la chaussée est libre en translation suivant l'axe "Z" sur les quatre faces en profondeur. La base du modèle est bloquée dans tous les sens parce que le sol support est considéré semi infini.



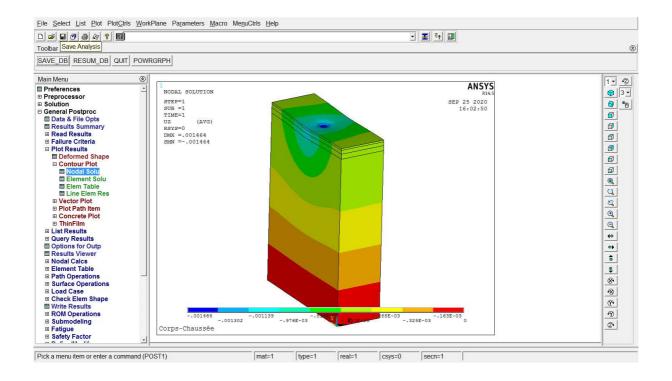
Figure(III.12): Conditions aux limites de plaque FGM

La surface de contacte (pneu-chassée) est sous une pression de charge répartie uniformément et dynamique transitoire de valeur (40KN). Après la résolution on aura la chaussée déformé dans le sens vertical (figure III.14).

Le chargement est présenté sous la forme d'une onde triangulaire d'une durée de 0,15 seconde correspondant à une vitesse moyenne de l'ordre de 40 km/h avec un pic de charge de 40 kN ( $\sigma$ =870000Pa) est retenue dans cette étude ;voir Figure 11. La durée entre deux essieux successifs est supposée être de 0,15 seconde.



Figure(III.13): Fonction de chargement et temps



Figure(III.14): Déplacement du corps de chaussée suivant "z"

### **III.5. Conclusion:**

Le logiciel ANSYS, dans sa version ANSYS Mechanical ou Multiphysics, permet une gamme complète d'analyses structurales. Le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language, C'est le langage de programmation utilisé par les logiciels de calcul par éléments finis d'Ansys). ANSYS classique est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

### CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 1. Introduction:

Dans ce chapitre on va présenter et discuter les résultats de la modélisation du corps de chaussée qui est constitué d'une couche de roulement en béton bitumineux, une couche de base en grave bitumineux ,une couche de fondation en grave non traité , et le sol support et cela sous des charges de pneus super simple modéliser comme une surface de contacte. Les résultats présentés ci dessous est celle d'une analyse dynamique transitoire avec le changement de la température de la couche en BB et la couche et GB, afin de vérifier l'effet de la température sur la déformation par ornière de la chaussée flexible.

#### IV.2. Résultats:

Dans ce qui suit on va essayer d'exposer les résultats de la modélisation du corps de chaussée routier sous différents chargement par un modèle de pneus supeur simple avec une analyse dynamique et avec des différentes données concernant la couche de BB et GB pour des températures qui varies:

## IV.2. 1. Déplacement verticale (UZ):

Les résultats de l'analyse dynamique présentés sont pour des charges uniformément répartie (40KN) sur la surface de contacte pneu - chaussée et pour différent températures ( $T=20C^{\circ}$ ,  $T=30C^{\circ}$ , et  $T=45C^{\circ}$ ).

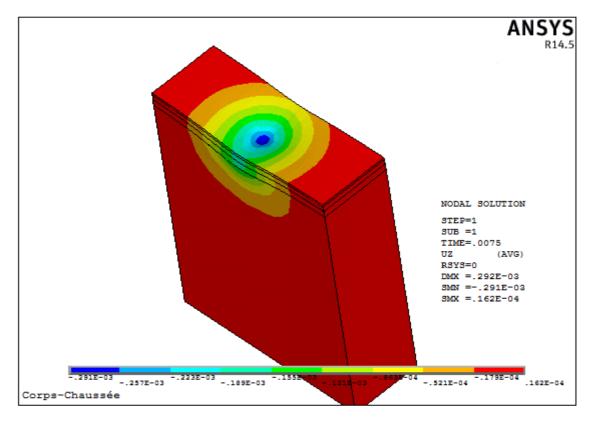


Figure (IV.1): Déplacement suivant l'axe UZ pour une charge 40KN et  $T=20C^{\circ}$ - t=0.0075s

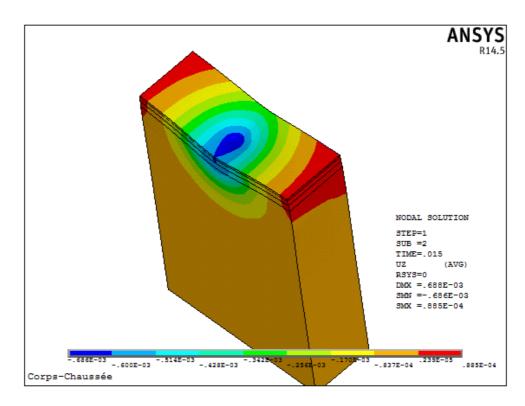


Figure (IV.2): Déplacement suivant l'axe UZ pour une charge 40KN et T=20C°-t=0.015s

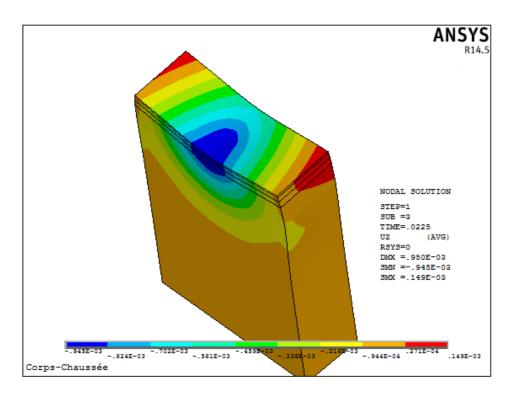


Figure (IV.3): Déplacement suivant l'axe UZ pour une charge 40KN et T=20C°-t=0.0225s

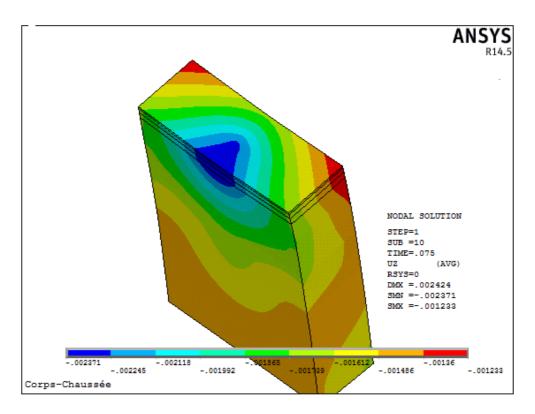


Figure (IV.4): Déplacement suivant l'axe UZ pour une charge 40KN et T=20C°-t=0.075s

Le déplacement verticale (ornière) se développe avec la diminution de la température de façon que l'ornière accroitre de 0.3 mm chaque 10 C° c'est se que nous pourrons le constater dans la figure ci dessous. Et pour la température 20°C après un seuil élastique les déplacement s'aggrave, et cela est du généralement à la rupture des couches de base et de fondation (Figure IV.1, 2, 3, 4).

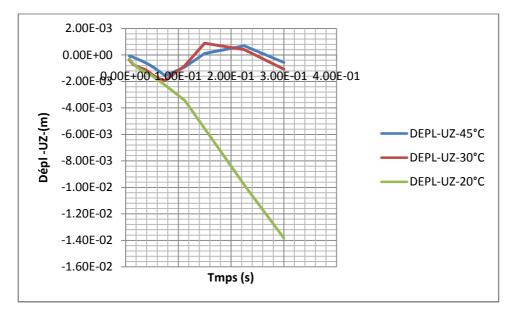


Figure (IV.5): Variation du déplacement verticale par rapport à la température

# **IV.2. 2. Déformation verticale (εz):**

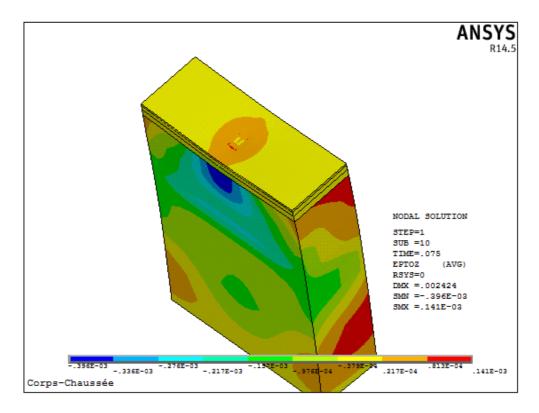


Figure (IV.6): Déformation suivant l'axe Z pour une charge 40KN et  $T=20C^{\circ}$ 

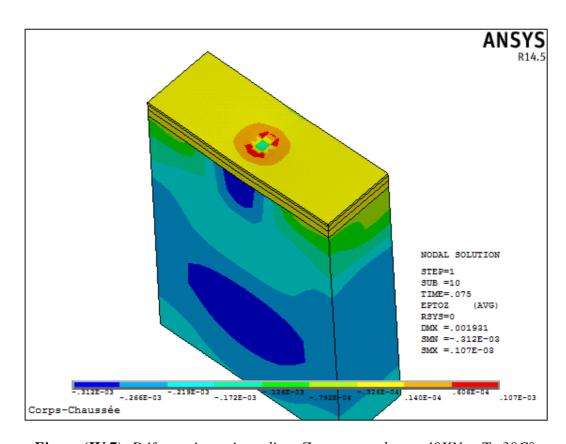


Figure (IV.7): Déformation suivant l'axe Z pour une charge 40KN et  $T=30C^{\circ}$ 

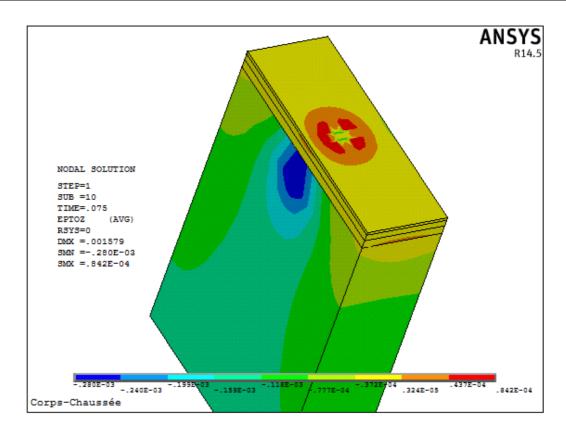


Figure (IV.8):: Déformation suivant l'axe Z pour une charge 40KN et T=45C°

Les déformations verticale sont transmis aux couches inferieures d'une façon plus profonde dans la température 20°C, et affectent la couche de surface (BB &GB) d'une manière significatif pour la température 45°C parce que elles sont moins rigides que les couches inferieures (Figure IV.9).

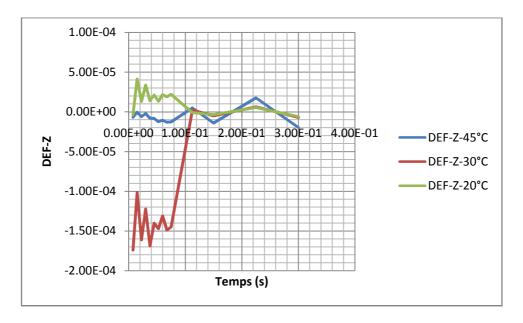


Figure (IV.9): Déformation-Z dans sous la charge du pneu

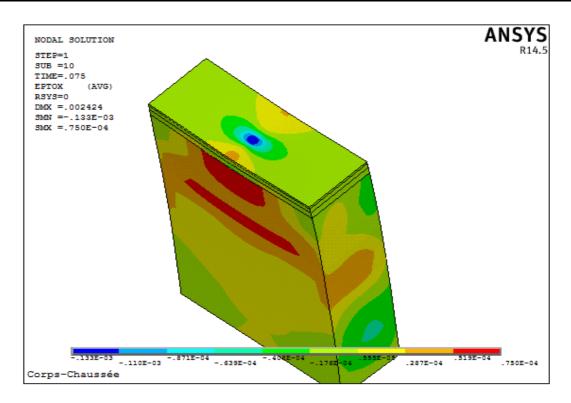


Figure (IV.10): Déformation suivant l'axe X pour une charge 40KN et  $T=20C^{\circ}$ 

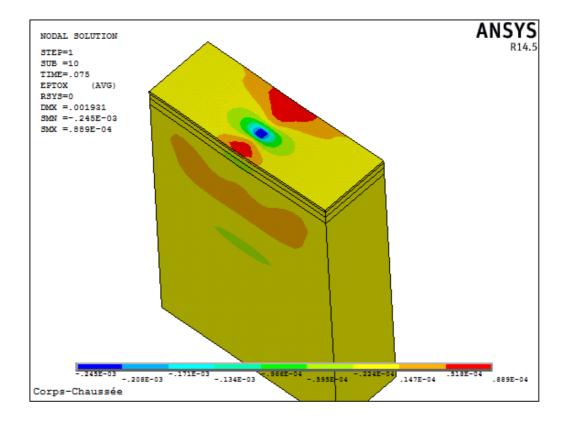


Figure (IV.11): Déformation suivant l'axe X pour une charge 40KN et  $T=30C^{\circ}$ 

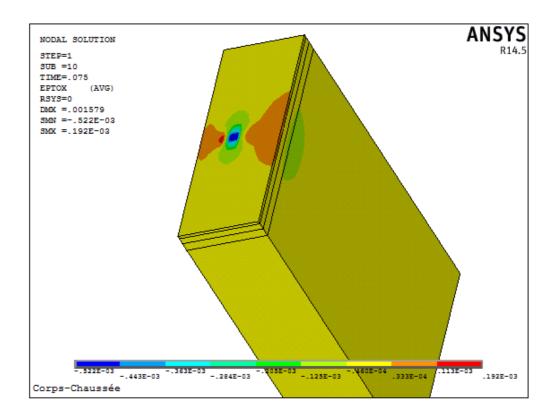


Figure (IV.12): Déformation suivant l'axe X pour une charge 40KN et  $T=45C^{\circ}$ 

Les déformations horizontale suivant l'axe X c-a-d- la largeur de la chaussé affectent les couches inferieures d'une façon plus profonde avec l'augmentation de la température (Figure IV.13).

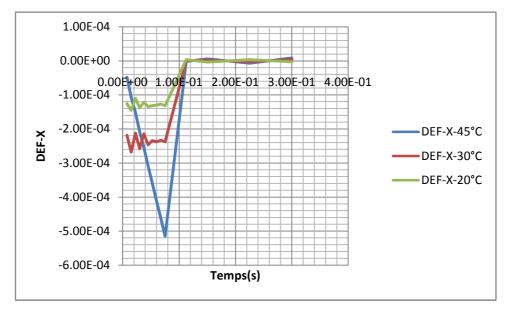


Figure (IV.13): Déformation-X sous la charge du pneu

# IV.2. 3. Spectre d'accélération :

Dans les figures qui suit les spectres d'accélération suivant l'axe Y sous un chargement de pneu de 40KN sous différentes températures:

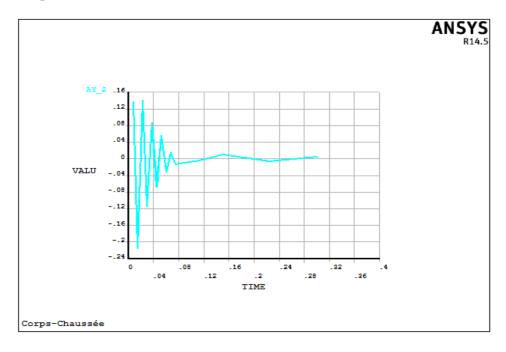


Figure (IV.14): Spectre d'accélération-Y sous la charge du pneu pour T=20°C

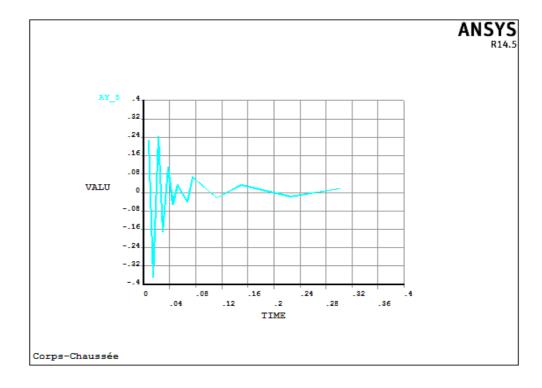


Figure (IV.15): Spectre d'accélération-Y sous la charge du pneu pour T=30°C

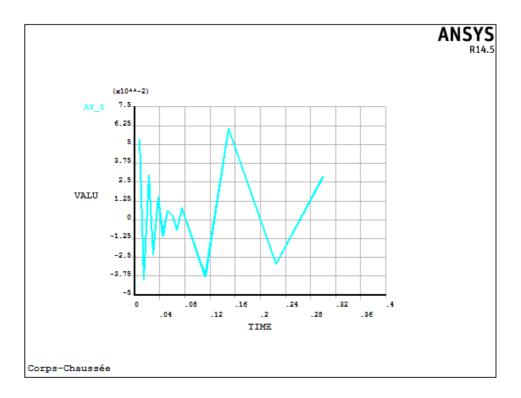
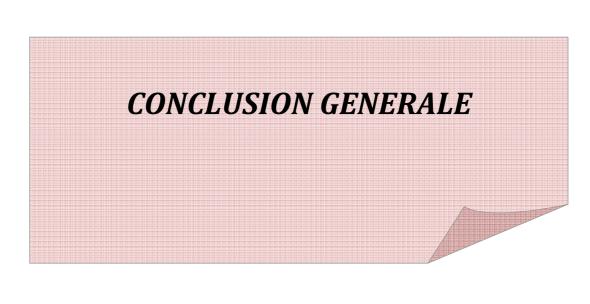


Figure (IV.16):: Spectre d'accélération-Y sous la charge du pneu pour T=45°C

On remarque que l'intensité de l'accélération de la repense du corps de chaussée sous le chargement diminue au fur et mesure avec l'augmentation de la température.

#### **IV.3. Conclusion:**

L'effet de la variation de la température combinée avec la charge du trafic lourds a un effet remarquable sur la déformation des chaussés souple et cela pour un chargement dynamique transitoire.



# **CONCLUSION GENERALE**

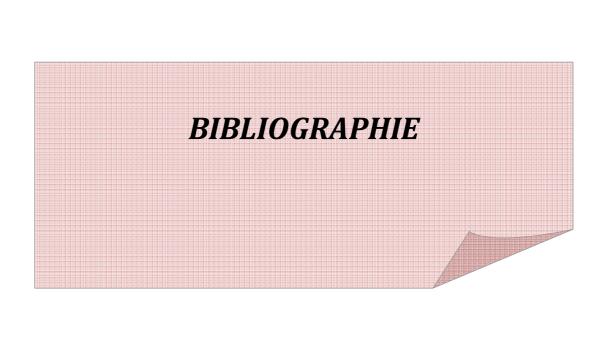
Prédire l'ornière des chaussées et plus particulièrement des couches de surface et éventuellement prolonger leur durée de vie reste de nos jours un défi majeur pour les constructeurs de route dans le monde entier. Pour cela, il est nécessaire de se procurer des moyens efficaces pour approfondir les études sur ces problématiques afin de mieux concevoir les chaussées pour une meilleure durée de vie et une maintenance réduite. D'autant plus que l'ère numérique nous permet de développer un outil robuste et bien adapté pour la prédiction des ornières d'instabilité qui sont des dégradations devenues de plus en plus fréquente.

L'état des connaissances met en avant l'importance de contrôler les paramètres extérieurs (température, teneur en eau, climat). Les répartitions des pressions et des contraintes au sein d'un pneu et les répercutions sur les déformations dans la chaussée sont bien plus complexes que les modèles utilisés de conception.

Après L'analyse du modèle avec différents et à des températures différent on peut conclue ce qui suit:

L'analyse montre que l'orniérage causé par la dégradation des couches inférieures est moins important que celui causé par la dégradation de la couche de surface. L'orniérage causé par la déformation dans la couche de surface est accompagné par un bourrelet pour des température élevé de 45°C, qui est moins prononcé que celui résultant d'une dégradation des couches inférieures.

Le modèle élastique linéaire adopté dans l'étude pour les matériaux utilisé dans le corps de chaussée souple présente plusieurs limites. A cet effet il est recommandé en perspective qu'on proposes pour des études ultérieur de choisir des modèle bien adapté au comportement des matériaux comme le modèle viscoelastique pour les enrobé bitumineux et le modèle élastoplastique pour les matériaux granulaire.



#### **BIBLIOGRAPHIE**

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1]: Y. Zhao, L. Jiang, L. Zhou, Temperature and vehicle loading effects on asphalt concrete pavement rutting development, in: Proceeding of 5th International Conference on Transportation Engineering, ICTE 2015, 2015, pp. 1084–1091.
- [2]:X. Teng, X. Li, K. Chou, Application of finite element analysis to access the rutting potential in asphalt pavements, in: Transportation and Development Innovative Best Practices 2008, 2008, pp. 480–485.
- [3]: Z. Yao, L. Zhou, Q. Shang, et al., Analysis of rutting change rule on asphalt pavement overlay, Adv. Mater. Res. 368–373 (2011) 3131–3136.
- [4] :S. Pirabarooban, M. Zaman, R.A. Tarefder, Evaluation of rutting potential in asphalt mixes using finite element modeling, in: Proceedings of the Transportation Facto 2003, Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada, 2003.
- [5]:K. Xia, Finite element modeling of dynamic tire/pavement interaction, in: Proceedings of the Pavements and Materials: Characterization and Modeling Symposium, 2010, pp. 204–214.
- [6] :S. Li, Z. Guo, Y. Yang, Rutting resistance ability analysis of heavy duty asphalt pavements based on consecutive temperature variation and finite element method, Proc. CICTP 2015 (2015) 992–1008.
- [7]: P. Cao, D. Feng, R. Jing, Based on FE method to research resistant rutting ability of pavement structure in Heilongjiang province, Appl. Mech. Mater. 128–129 (2011) 1349–1354.
- [8]: J. Zhu, M. Zhang, M. Gao, et al., Mechanical analysis on rutting resistance in asphalt pavement, Proc. ICCTP 2010 (2010) 3611–3617.
- [9]: R. Imaninasab, B. Bakhshi, B. Shirini, Rutting performance of rubberized porous asphalt using Finite Element Method (FEM), Constr. Build. Mater. 106 (2016) 382–391.
- [10]: X. Hu, S. Zhong, L.F. Walubita, Three-dimensional modelling of multilayered asphalt concrete pavement structures: strain responses and permanent deformation, Road Mater. Pavement Des. 71 (3) (2015) 1–14.

- [11]: MODELISATION AVANCEE DU CONTACT PNEU-CHAUSSEE POUR L'ETUDE DES DEGRADATIONS DES CHAUSSEES EN SURFACE, Edem Yawo Manyo, Thèsepour obtenir le grade de docteur de l'université de limoges, le 14 Février 2019.
- [12]: PRÉDICTION DE L'ORNIÉRAGE LIÉ AUX DÉFORMATIONS PERMANENTES DES ENROBÉS BITUMINEUX, MathieuMEUNIER, thèse présentée à l'école de technologie supérieure université du Québec Montréal, le 15 octobre 2012.
- [13] :PREDICTION DES DEFORMATIONS PERMANENTES DES COUCHES DE SURFACE DES CHAUSSEES BITUMINEUSES, Dang-Truc NGUYEN, thèse présentée pour l'obtention du diplôme de docteur de l'école nationale des ponts et chaussées soutenue le 16 novembre 2006 `a l'E.N.P.C
- [14]: FORMULATION D'ENROBES BITUMINEUX DE TYPE ESG10 ET GB20 AVEC
  INCORPORATION DE PARTICULES DE VERRE, Alexandre T.BACHAND, école de technologie
  supérieure université du Québec, Montréal, le 4 avril 2018.
- [15] : Berthe-Julienne DONGMO / Thèse en génie civil / 2005 / Institut national des sciences appliquées de Lyon
- [16]: MODELISATION NUMERIQUE DISCRETE DES MATERIAUX BITUMEUX Minh-Duc Nguyen Université de Lyon, 2017.
- [17]: MODELE NUMERIQUE POUR COMPORTEMENT MECANIQUE DES CHAUSSEES: application à l'analyse de l'orniérage, BassemALI, ET TECHNOLOGIES DE LILLE, Année 2006.
- [18]: WassilTIGHIOUART, Mohamed ZAOUI Etude de comportement élastique linéaire et non linéaire des chaussées souples, universite m'hamedbouguara-boumerdes.
- [19]:Sandoumbé TRIAW, 2006, mémoire : Dimensionnement mécanistique-empirique des structures de chaussée : Application au tronçon Séo- Diourbel, université Cheikh Anta Diop deDakar.
- [20]: DORE G. (2003) Conception et analyse deschaussées.
- [21]:RESPONSE OF CONCRETE PAVEMENTS UNDER MOVING VEHICULAR LOADS AND ENVIRONMENTAL EFFECTS, Mostafa YousefiDarestani, Doctor of Philosophy, Queensland University of Technology, 2007

- [22]:RESPONSE OF CONCRETE PAVEMENTS UNDER MOVING VEHICULAR LOADS AND ENVIRONMENTAL EFFECTS, Mostafa YousefiDarestani, Doctor of Philosophy, Queensland University of Technology, 2007
- [23]: MODELE NUMERIQUE POUR COMPORTEMENT MECANIQUE DES CHAUSSEES:

  APPLICATION A L'ANALYSE DE L'ORNIERAGE, BassemALI, thèse de doctora de l'universite des sciences et technologies de lille,2006.
- [24]:RODRIGO SALGADO & DAEHYEON KIM, effects of heavier truck loadings and super-single tires on subgrades, final report, Indiana department of transportation and the u.s. department of transportation federal highway administration, 2002.
- [25]: RAHMANI Hanane, KADDAR Fatima, 2013, mémoire: Etude de modernisation réhabilitation et de l'impact sur l'environnement de la route nationale numéro 2 sur 3km, université AboubekrBelkaid Tlemcen.
- [26]: DYNAMIQUE DES STRUCTURES ET DES OUVRAGES Alain PECKER, Ecole nationale des ponts etchaussées, 2006.
- [27]: MODELISATION AVANCEE DU CONTACT PNEU-CHAUSSEE POUR L'ETUDE DES

  DEGRADATIONS DES CHAUSSEES EN SURFACE EdemYawoManyo .Thèse doctorat de l'université de limoges le 14 février 2019
- [28]: JULIETTE SOHM, PREDICTION DES DEFORMATIONS PERMANENTES DES MATERIAUX BITUMINEUX, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2011.
- [29]: THE FINITE ELEMENT METHOD AND APPLICATIONS IN ENGINEERING USING ANSYS ERDOGAN, Madenci Ibrahim Guven, Springer International Publishing 2015 Second Edition

# **BIBLIOGRAPHIE**