

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DE LILLE

Année : 2006

N° d'ordre : 3851

THESE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES DE LILLE**

Discipline : Génie Civil

Titre

**Modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées :
application à l'analyse de l'orniérage**

Préparée au

**Laboratoire de Mécanique de Lille (UMR 8107)
Ecole Polytechnique Universitaire de Lille**

Par

Bassem ALI

Soutenue le Vendredi 6 octobre à 10 h30 devant la commission d'examen composée de

Monsieur:

| | |
|------------------------|---------------------------|
| H. Di BENEDETTO | Président |
| A-G. DUMONT | Rapporteur |
| M. ROUAINIA | Rapporteur |
| K. WOZNICA | Examineur |
| J-P. CHRISTORY | Examineur |
| M. SADEK | Examineur |
| I. SHAHROUR | Directeur de thèse |

à Aber et Taïm
à ma mère et mon père

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements, et sans doute les plus vifs, sont adressés à mon directeur de thèse Professeur **Isam SHAHROUR** qui a été un réel exemple pour moi. Il a su me communiquer la rigueur et la meilleure manière de travailler. Son œil critique m'a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différentes sections. Je remercie également **M. SADEK** qui m'a aidé et soutenu beaucoup pendant ces années de thèse.

Ensuite je tiens à remercier Messieurs **A-G. DUMONT** et **M. ROUAINIA**, qui ont accepté de rapporter mon travail de thèse, et qui ont rédigé des rapports sérieux, minutieux et consciencieux.

J'exprime tout mon remerciement à Monsieur **H. Di BENEDETTO** pour m'avoir fait l'honneur d'être examinateur et président du jury. Je remercie également Messieurs **K. WOZNICA** et **J -P. CHRISTORY** pour m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail

Je remercie l'ensemble de mes amis pour leur soutien et leur encouragement durant ce travail, en particulier **Alia HATEM**, **Mazen SAMARA** et **Fahmi ZAÏRI**.

Je suis très reconnaissant au laboratoire des voies de circulation **LAVOC** qui a mis à ma disposition gracieusement des données expérimentales sur les essais en vraie grandeur.

Quant à mon épouse **Aber**, mon père, ma mère, ma belle mère, mes frères **Aous** et **Anas**, ma sœur **Faten** et tous les membres de famille, je leur adresse mes plus chaleureux remerciements. Leur soutien moral indispensable pour moi, m'a permis de tenir bon et de ne pas abandonner dans les moments difficiles. Ils ont su me soutenir, et parfois me supporter.

SOMMAIRE

Résumé

Abstract

| | |
|-----------------------------|---|
| Introduction générale | i |
|-----------------------------|---|

CHAPITRE 1

Bibliographie

| | |
|---|-----------|
| 1.1 introduction | 1 |
| 1.2 Dégradation par orniérage | 3 |
| 1.2.1 Mécanismes d’orniérage | 4 |
| 1.2.2 Types d’orniérage..... | 5 |
| 1.2.3 Facteurs influençant l’ornière..... | 6 |
| <i>Structure de la chaussée.....</i> | <i>6</i> |
| <i>Facteurs liés au trafic.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Facteurs environnementaux.....</i> | <i>13</i> |
| 1.2.4 Méthodes d’évaluation de l’orniérage de la chaussée souple..... | 14 |
| <i>Méthodes statistiques.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Essais accélérés de la chaussée.....</i> | <i>16</i> |
| 1.3 Modèles proposés pour analyser la chaussée | 16 |
| 1.3.1 Modèles pour l’enrobé bitumineux..... | 16 |
| 1.3.2 Modèles pour les couches inférieures de chaussées..... | 19 |
| 1.3.3 Modélisation de la charge du pneu..... | 20 |
| <i>Simplification la surface de contact.....</i> | <i>20</i> |
| <i>La contrainte de contact de l’empreinte.....</i> | <i>23</i> |

| | |
|--------------------------------------|----|
| <i>Déplacement transversal</i> | 25 |
| 1.4 Conclusion | 27 |

CHAPITRE 2

Analyse par élément finis de l'orniérage

| | |
|--|----|
| 2.1 Introduction | 28 |
| 2.2 Lois de comportement | 28 |
| 2.2.1 Couches d'assises | 28 |
| 2.2.2 Couche de surface | 29 |
| <i>Influence de la température</i> | 29 |
| 2.3 Modèle du chargement | 30 |
| 2.3.1 Détermination du temps de passage du pneu..... | 30 |
| <i>Temps du chargement pour un élément</i> | 30 |
| <i>Simplification du temps d'un passage du pneu</i> | 32 |
| <i>Simplification du temps de N passages du pneu</i> | 33 |
| 2.3.2 Modélisation de la charge du pneu..... | 33 |
| 2.3.3 Analyse de l'influence du mode de chargement..... | 35 |
| <i>Simplification du temps de passage</i> | 37 |
| <i>Simplification du temps de N passages</i> | 37 |
| <i>Simplification de la charge du pneu (valeur et surface de contact avec la chaussée)</i> | 38 |
| 2.4 Conclusion | 45 |

CHAPITRE 3

Validation numérique sur des essais en vraie grandeur

| | |
|--|-----------|
| 3.1. Introduction | 46 |
| 3.2. Description des essais..... | 46 |
| 3.2.1 Présentation de la section d'étude..... | 47 |
| 3.2.2 Chargement..... | 49 |
| 3.2.3 Mesures effectuées | 50 |
| 3.3 Détermination des paramètres des modèles | 50 |
| 3.3.1 Couche de surface | 50 |
| <i>Partie élastique (E, ν)</i> | 50 |
| <i>Partie irréversible</i> | 53 |
| 3.3.2 Couches inférieures..... | 57 |
| 3.4 Validation du modèle..... | 57 |
| 3.4.1 Déformation horizontale à la base de la couche de surface..... | 59 |
| 3.4.2 Déplacement vertical..... | 63 |
| 3.4.3 Comportement à long terme..... | 64 |
| 3.5 Conclusions..... | 68 |

Chapitre 4

Etude paramétrique et applications

| | |
|--|-----------|
| 4.1. Introduction..... | 69 |
| 4.2. Influence des paramètres liés au trafic..... | 69 |
| 4.2.1 Nombre du passage | 69 |
| 4.2.2 Charge par essieu | 73 |
| 4.2.3 Pression de gonflage..... | 74 |
| 4.2.4 Type du pneu | 75 |
| 4.2.5 Déplacement transversal (wander)..... | 76 |
| 4.2.6 Influence de la vitesse de la circulation | 79 |
| 4.3 Influence de la température..... | 80 |
| 4.4 Caractéristiques des matériaux des couches..... | 84 |
| 4.5 Applications à la prédiction de la durée de vie..... | 88 |
| 4.5.1 Variations environnementales..... | 88 |
| 4.5.2 Matériaux à module élevé (EME1)..... | 90 |
| 4.5.3 Application en milieu urbain..... | 94 |
| <i>Utilisation d'enrobé à module élevé en milieu urbain.....</i> | <i>95</i> |
| 4.6 Réparation des chaussées dégradées..... | 95 |
| 4.6.1 Influence du matériau utilisé pour l'entretien..... | 96 |
| 4.6.2 Influence de l'épaisseur de la couche de réparation | 97 |
| 4.7 Conclusion..... | 99 |

Figures

| Figure | Titre | page |
|---------------|---|-------------|
| 1.1 | Section d'une chaussée souple..... | 1 |
| 1.2 | Exemple d'une chaussée atteinte d'orniérage (Chen 2004)..... | 3 |
| 1.3 | Types d'ornières dans les chaussées souples (White et al. 2002) | 5 |
| 1.4 | Influence de l'épaisseur de la couche de surface sur la déformation verticale au dessus de la couche de base et de plate-forme support (Ekdahl. 1999) | 7 |
| 1.5 | Influence de l'épaisseur des couches de surface et de la configuration d'essieu sur la profondeur d'orniérage (Gillespie et al. 1993)..... | 8 |
| 1.6 | Influence de la pression de gonflage et de la charge par essieu sur la contrainte verticale (Archilla et al. 2001)..... | 10 |
| 1.7a | Influence de la vitesse de circulation sur la déformation longitudinale en dessous de la couche de surface (Brown 1997)..... | 11 |
| 1.7b | Influence de la fréquence sur le module E^* de l'enrobé bitumineux (Perret 2002)..... | 11 |
| 1.8a | Influence du déplacement transversal sur la profondeur de l'orniérage (White et al. 1999)..... | 12 |
| 1.8b | Influence du déplacement transversal sur le profil de l'orniérage (White et al. 1999)..... | 13 |
| 1.9a | Déformation de la couche de surface en fonction de la vitesse de circulation et de la température de la couche de surface (Ekdahl, 1999)..... | 14 |
| 1.9b | Effets de la variation saisonnière de la température et de l'humidité sur l'orniérage (White et al. 1999)..... | 14 |
| 1.10 | Composantes de la déformation dans le premier cycle d'un essai de fluage... | 17 |
| 1.11a | Simplification de la surface de contact d'un pneu (Huang 1993)..... | 20 |
| 1.11b | Photo de l'empreinte du pneu super single de Michelin 385/65R22 avec une charge par essieu de 8 tonnes et une pression de gonflage de 800 kPa (Perret, 2003)..... | 21 |
| 1.12a | Influence de la charge par essieu sur le ratio largeur/longueur pour plusieurs types du pneu (Blab, 1999)..... | 22 |
| 1.12b | Influence de la pression de gonflage sur le ratio largeur/longueur pour plusieurs types de pneu (Blab, 1999)..... | 22 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.12c | Différents niveaux de pression de contact sur les bandes de roulement de l'empreinte du pneu (Fanget al. 2004)..... | 24 |
| 1.13a | Influence de la largeur de la voie sur la distribution des véhicules en circulation sur la chaussée (White et al. 2002)..... | 25 |
| 1.13b | Orniérage avec différentes simplifications de l'empreinte du pneu super single (Hua. 2002)..... | 26 |
| 2.1a | Temps d'un incrément de chargement..... | 31 |
| 2.1b | Transformation du temps de chargement | 32 |
| 2.1c | Simplification du mode de chargement (Fang2001)..... | 33 |
| 2.2a | Pneu jumeau (Michelin 295/80R22)..... | 34 |
| 2.2b | Pneu super single (Michelin 385/65R22.5)..... | 34 |
| 2.3 | Simplifications de la charge du pneu sur la surface de la chaussée..... | 35 |
| 2.4 | Maillage utilisé pour étudier la modélisation de la charge du pneu..... | 36 |
| 2.5 | Influence de la discrétisation dans le temps sur la réponse de la chaussée. | 37 |
| 2.6 | Influence de la modélisation du temps de chargement..... | 38 |
| 2.7a | Modélisation du chargement du pneu super single (charge/essieu =11,5 tonnes, pression de gonflage = 800 kPa)..... | 39 |
| 2.7b | Modélisation du chargement du pneu super single (charge/essieu = 8 tonnes, pression de gonflage = 600 kPa)..... | 40 |
| 2.8a | Influence de la modélisation du chargement sur le déplacement vertical (charge/essieu = 11,5 tonnes, pression = 800 kPa)..... | 41 |
| 2.8b | Influence de la modélisation du chargement sur le déplacement vertical (charge/essieu =11,5 tonnes pression = 600 kPa)..... | 41 |
| 2.9 | Influence du mode de chargement sur le cisaillement (charge du pneu de 8 tonnes, pression de gonflage de 800 kPa, pneu super single)..... | 42 |
| 2.10a | Différentes modélisations pour l'empreinte d'un pneu jumeau (charge de pneu de 26 kN et une pression de gonflage de 720 kPa, pneu de Goodyear 11R22.5)..... | 43 |
| 2.10b | Profondeur de l'orniérage avec différentes modélisation de l'empreinte, pneu jumeau (Goodyear 11 R22.5)..... | 44 |
| 3.1 | Chaussée utilisée dans les essais en vraie grandeur | 49 |
| 3.2a | Variation du paramètre $a_{(E)}$ en fonction de la température pour l'enrobé | 53 |

| | | |
|------|---|----|
| | bitumineux de HMT22s..... | |
| 3.2b | Variation du paramètre $a_{(E)}$ en fonction de la température pour l'enrobé bitumineux de MR11..... | 54 |
| 3.2a | Variation du paramètre A_r avec la température pour l'enrobé bitumineux de MR11..... | 55 |
| 3.2b | Variation du paramètre A_r avec la température pour l'enrobé bitumineux de HMT22s..... | 55 |
| 3.2c | Machine de la résistance de l'orniérage, modélisation 3D de l'éprouvette... | 56 |
| 3.3 | Surface du chargement appliqué par le pneu..... | 58 |
| 3.4 | Section de la chaussée avec modélisation 3D..... | 59 |
| 3.5a | Validation du modèle : déformation longitudinale à la base de la couche de surface (pression de gonflage de 600 kPa, pneu super single)..... | 60 |
| 3.5b | Validation du modèle : déformation longitudinale à la base de la couche de surface (pression de gonflage de 800 kPa et du pneu super single) | 60 |
| 3.6a | Validation du modèle : déformation longitudinale à la base de la couche de surface en fonction de la température (pression de gonflage de 600 kPa et du pneu jumeau)..... | 61 |
| 3.6b | Validation du modèle : déformation longitudinale à la base de la couche de surface (pression de gonflage de 700 kPa et du pneu jumeau)..... | 61 |
| 3.6c | Validation du modèle : déformation longitudinale à la base de la couche de surface (pression de gonflage de 800 kPa et du pneu jumeau)..... | 62 |
| 3.7 | Validation du modèle numérique: déplacement vertical de la surface de la chaussée pour les deux pneus..... | 64 |
| 3.8a | Section de la chaussée avec modélisation 2D | 65 |
| 3.9b | Développement de l'orniérage en fonction de nombre de passage (essais réalisés, Perret et al. 2001, 2003..... | 66 |
| 3.8c | Comparaison entre le modèle et les mesures pour la phase d'initiation du développement de l'orniérage..... | 66 |
| 3.8d | Comparaison entre le modèle et les mesures pour la phase de propagation du développement de l'orniérage..... | 67 |
| 3.8e | Forme de l'orniérage pour différents nombres de passages..... | 67 |
| 4.1a | Influence du nombre de passages sur l'orniérage (pneu super single, charge/essieu = 11,5 tonnes et pression de gonflage = 800 kPa) | 70 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.1b | Influence du nombre de passages sur la déformation de fluage dans la couche d'enrobé bitumineux..... | 71 |
| 4.1c | Figure: Influence du nombre de passages sur la déformation plastique dans les couches inférieures | 72 |
| 4.1d | Influence du nombre de passages sur le développement de l'orniéage..... | 73 |
| 4.2 | Influence de la charge/essieu sur l'orniéage (pneu super single, pression de gonflage = 800 kPa)..... | 74 |
| 4.3 | Influence de la pression de gonflage sur l'orniéage (pneu super single, charge/essieu =11,5 tonnes) | 75 |
| 4.4 | Influence du type de pneu sur la forme de l'orniéage | 76 |
| 4.5a | Distribution de passages sur la chaussée..... | 77 |
| 4.5b | Influence du déplacement transversal sur le développement de l'orniéage... | 78 |
| 4.5c | Influence du déplacement transversal sur la forme de l'orniéage (pneu super single)..... | 78 |
| 4.5d | Influence du déplacement transversal sur la forme de l'orniéage (pneu jumeau) | 79 |
| 4.6 | Influence de la vitesse de circulation sur l'orniéage | 80 |
| 4.7a | Influence de la température sur le développement de l'orniéage..... | 81 |
| 4.7b | Influence de la température sur la forme de l'orniéage | 81 |
| 4.7c | Influence de la température sur la déformation irréversible en dessous de la couche de surface..... | 82 |
| 4.7d | influence de la température sur la distribution de la déformation irréversible dans la couche de surface | 82 |
| 4.7e | Influence de la température sur le développement de la déformation verticale au sommet de la couche de support..... | 83 |
| 4.7f | Influence de la température sur la distribution de la déformation dans les couches inférieures..... | 84 |
| 4.8a | Influence du module de déformation de la couche de surface sur l'orniéage | 85 |
| 4.8b | Influence du paramètre A_T de l'enrobé bitumineux sur l'orniéage..... | 86 |
| 4.8c | Développement de l'orniéage en fonction du changement de E de couche de base et du sol de support..... | 87 |
| 4.8d | Influence du module de déformation de différentes couches sur | 87 |

| | | |
|-------|---|----|
| | l'orniérage..... | |
| 4.8e | Forme de l'orniérage (a) réduction des propriétés de la couche de surface et (b) réduction du module de déformation dans la couche de support. | 88 |
| 4.9a | Influence de la température sur le nombre de passages d'essieu équivalent causant un orniérage de 12,5 mm..... | 89 |
| 4.9b | Influence de la température sur le nombre de passages d'essieu équivalent causant un orniérage de 8 mm..... | 89 |
| 4.10a | Section de la chaussée avec la couche de l'enrobé à module élevé (EME1) | 90 |
| 4.10b | Analyse granulométrique de l'enrobé à module élevé (EME1)..... | 91 |
| 4.10c | Figure: Influence du type de béton bitumineux sur l'orniérage..... | 93 |
| 4.11a | Développement de l'orniérage dans la chaussée en milieu urbain en fonction du nombre de passage | 94 |
| 4.11b | Influence des matériaux utilisés dans les chaussées en milieu urbain sur l'orniérage..... | 95 |
| 4.12a | Section utilisée dans l'analyse des procédés d'entretien..... | 96 |
| 4.12b | Influence de l'entretien sur la durée de vie (exprimée par le nombre de passages équivalent) en utilisant deux types d'enrobé. | 96 |
| 4.13a | Influence de l'épaisseur de la couche de remplacement sur le développement de l'orniérage | 97 |
| 4.13b | Influence du type de l'entretien (les couches remplacées) sur le développement de l'orniérage..... | 98 |

Tableaux

| Tableau | Titre | Page |
|----------------|--|-------------|
| 2.1a | Propriétés de la couche de surface | 36 |
| 2.1b | Propriétés de la couche de base et de fondation..... | 36 |
| 2.2 | Configuration de deux types de pneus jumeaux ; Michelin et Goodyear (Cost 334)..... | 43 |
| 3.1a | Analyse granulométrique des matériaux utilisés dans la section d'essais..... | 48 |
| 3.1b | Caractéristiques d'enrobés bitumineux utilisés dans la section d'essais..... | 48 |
| 3.1c | Détails sur l'analyse granulométrique de la couche sol de support..... | 59 |
| 3.2a | Valeur du module d'élasticité mesuré en fonction de la température et la fréquence de chargement (matériau MR11)..... | 51 |
| 3.2b | Valeur du module d'élasticité mesuré en fonction de la température et la fréquence de (matériau HMT22s)..... | 52 |
| 3.3a | Valeurs des paramètres pour l'enrobé bitumineux déterminées à 30° C..... | 54 |
| 3.3b | Déformation longitudinale en dessous de la couche de la surface (mesurées et modélisation)..... | 56 |
| 3.3c | Taux d'orniérage avec la modélisation et l'essai de résistance (Nf P 98-253.1) | 56 |
| 3.4 | Paramètres de résistance pour les couches d'assise et de sol de support | 57 |
| 3.6 | Validation du modèle: déformation longitudinale à la base de la couche de surface pour un pneu jumeau..... | 62 |
| 3.7 | Validation du modèle: déformation longitudinale à la base de la couche de surface pour un pneu super single..... | 63 |
| 4.1a | Caractéristiques d'enrobés bitumineux EME1 utilisé dans la section de la chaussées (Perret et al.2003)..... | 91 |
| 4.1b | Valeur du module d'élasticité mesuré en fonction de la température et la fréquence de l'enrobé à module élevé (EME1) (Perret et al.2003)..... | 92 |
| 4.1c | Valeurs des paramètres du modèle pour l'enrobé bitumineux EME1 déterminées à 50°C..... | 92 |

Résumé

Ce travail comporte une étude par la méthode des éléments finis du comportement mécanique des chaussées dans le but de mieux comprendre les mécanismes d'initiation et de développement de l'orniérage dans les chaussées souples et de déterminer une stratégie pour leur réparation. Il est présenté en quatre chapitres :

Le premier chapitre comporte une analyse des travaux réalisés sur l'orniérage, et plus particulièrement sur les causes, les mécanismes de formation, les facteurs d'influence et les approches de modélisation.

Le second chapitre présente le modèle numérique utilisé dans ce travail pour l'analyse du comportement mécanique des chaussées. Dans ce modèle, le comportement des couches inférieures est décrit à l'aide d'un modèle élastoplastique utilisant le critère de Mohr-Coloumb. Un modèle elasto-viscoplastique est utilisé pour les couches de surface. L'effet de la température est pris en compte à l'aide du principe de superposition temps-température. La détermination des paramètres du modèle est discutée, notamment les paramètres rhéologiques et du chargement.

Le troisième chapitre présente la validation du modèle proposé sur des essais en vraie grandeur réalisés au laboratoire, qui comportent à la fois des essais instantanés et à long terme.

Dans le quatrième chapitre, on présente une étude paramétrique sur l'influence de principaux facteurs (type de pneus, intensité de charge...) sur le développement de l'orniérage. Cette étude est suivie par une analyse de l'influence de la température et du type de trafic sur l'orniérage. Le chapitre comporte également une étude sur des stratégies de maintenance et de réparation des chaussées.

Abstract

This work comprises a contribution to modeling of flexible pavement by finite elements. This modeling allows to a better understanding to the mechanism of formation and development of rutting and to highlight issues on the management and maintenance of asphalt pavement damaged by rutting.

This study is presented in four chapters: The first chapter gives a detailed analysis of the causes, mechanisms type of rutting, factors influencing rutting, and the models of evaluations in the literature. Then a bibliographical synthesis on the models suggested to analyze the flexible pavement is followed.

The second chapter comprises the behavior laws used in this study for the various pavement layers. Detailed study on the determination of the modeling parameters applied to analyze the behavior of pavement for rutting in particular, and the simplification of the representation of the load of a tire are described.

A third chapter is presented to identify the parameters of the suggested model and its validation by using the results in full-scale test and in laboratory. The numerical results are compared with the instantaneous and with the long term responses of pavement.

In the fourth chapter, a parametric study is presented on the development of rutting and the effects of the principal factors (temperature, type of tires, and intensity of load...) influencing the propagation of rutting. This parametric study is followed by applications of modeling in the prediction of rutting under different environmental (temperature) and traffic conditions. This chapter includes an analysis presented to bring elements of the processes for the maintenance and the repair of the pavement damaged by rutting

Introduction générale

Les chaussées souples sont largement utilisées dans la construction routière. De par leur constitution et des conditions d'exploitation, elles peuvent subir divers types de dégradations, notamment l'orniérage qui nuit à la qualité de service de la chaussée. En effet, l'orniérage peut atteindre des profondeurs critiques mettant en péril la sécurité des usagers. Une profondeur d'ornière supérieure à 12,5 mm peut retenir l'eau et augmenter le risque d'aquaplaning pour le trafic à grande vitesse (un entretien s'impose pour une profondeur d'ornière supérieure à 8 mm, Washington State Department of Transportation, 2001).

Les ornières peuvent être classées en trois catégories :

- Les ornières d'usure: elles sont dues à la perte progressive des particules de granulats de la couche de surface. Ce type d'orniérage est causé par la combinaison du trafic et de l'environnement.
- Les ornières structurelles : elles résultent de la déformation verticale permanente dans la structure de la chaussée sous les chargements répétés du trafic.
- Les ornières d'instabilité : elles sont dues au déplacement latéral des matériaux dans la couche de la surface de l'enrobée bitumineux et sont d'autant plus fréquents dans les chaussées souples.

Les ornières peuvent être également classées d'après leur taille en 3 catégories : petites (6 à 12,5mm), moyennes (12,5 à 25mm) et grandes (>25mm). Toutefois, on signale l'existence de trois types d'orniérage dans les chaussées souples:

Différents mécanismes peuvent être à la base de l'orniérage. L'orniérage initial est causé par la densification de la chaussée sous le passage des pneus. L'évolution de l'orniérage est liée au cisaillement qui conduit à la formation de bourrelet aux abords du passage des pneus. Toutefois, pour les chaussées bien compactées, la contrainte de cisaillement dans la couche du béton bitumineux est le mécanisme principal d'orniérage. En général, l'orniérage est créé par les mécanismes suivants:

- La déformation plastique verticale (densification) dans la couche de l'enrobé bitumineux.

- Le fluage latéral dans la couche de l'enrobé bitumineux.
- La déformation des couches inférieures.

Plusieurs facteurs peuvent influencer le développement de l'orniérage comme la construction de la chaussée, les facteurs liés au trafic (type de pneus, charge par essieu, vitesse de déplacement, pression de gonflage) et les facteurs environnementaux.

Une bonne compréhension du mécanisme de développement de l'orniérage est donc nécessaire afin de réduire les coûts de maintenance et de l'éviter à l'étape de conception et de construction des chaussées. Les essais accélérés servent comme indicateur de la performance des chaussées. Cependant, en raison de la courte durée de ces essais et des conditions de chargement qui peuvent être très différentes des conditions réelles, ces essais ne sont pas suffisants pour prévoir le comportement des chaussées à long terme (orniérage). Ces essais, peuvent être complétés et appuyés par une modélisation numérique capable de prédire d'une manière correcte l'orniérage.

Les chaussées souples sont des matériaux multicouches composées de différents matériaux. Ce type de structures conduit à un comportement complexe, car les différentes couches peuvent présenter un comportement dépendant ou indépendant du temps, réversible ou irréversible, et dépendant ou indépendant de la température. Une étude fine de ce comportement nécessite le développement d'un modèle numérique qui peut reproduire la structure de la chaussée et le comportement de ses différents matériaux.

Ce travail de thèse a pour but de développer un modèle numérique pour les chaussées destiné à mieux comprendre le mécanisme de formation de l'orniérage et d'analyser le rôle de différents facteurs dans l'apparition de ce phénomène. Ceci permet d'analyser les stratégies d'entretien et de réparation des chaussées. Le travail de thèse comporte quatre parties :

La première comporte une analyse des travaux réalisés sur l'orniérage, et plus particulièrement ceux consacrés aux causes, mécanismes de formation, facteurs d'influence et approches de modélisation.

La seconde partie concerne le développement d'un modèle numérique pour l'analyse du comportement mécanique des chaussées. Dans ce modèle, le comportement des couches

inférieures est décrit à l'aide d'un modèle élastoplastique utilisant le critère de Mohr-Coloumb. Un modèle elasto-viscoplastique est utilisé pour les couches de surface. L'effet de la température est pris en compte à l'aide du principe de superposition temps-température. La détermination des paramètres du modèle est discutée, notamment les paramètres rhéologiques et du chargement.

La troisième partie comporte une validation du modèle proposé sur des essais en vraie grandeur réalisés au laboratoire comportant à la fois des essais instantanés et à long terme.

La dernière partie concerne une étude paramétrique de l'influence de principaux facteurs (type de pneus, intensité de charge...) sur le développement de l'orniérage. Cette étude est suivie par une analyse de l'influence de la température et du type de trafic sur l'orniérage. On étudie également des stratégies de maintenance et de réparation des chaussées.

Chapitre 1

Bibliographie

1.1 Introduction

Les chaussées souples sont largement utilisées dans le monde (Si et al. 2002). Le corps de la chaussée souple est constitué de trois types de couches : la couche de surface, la couche d'assise et la couche de plate-forme support. La couche de surface est composée d'une couche de roulement et d'une couche de base de en enrobé bitumineux. La couche d'assise peut comporter une couche de fondation (sub-base) et une couche de base (figure 1.1).

Les chaussées peuvent être classifiées selon l'importance du trafic dans les catégories suivantes (SET 94, Gidel, 2001) : les chaussées souples pour les trafics faibles ; les chaussées bitumineuses épaisses, pour des trafics importants; les chaussées semi-rigides (couches d'assise traitées aux liants hydrauliques ou carbonique) pour des trafics très élevés.

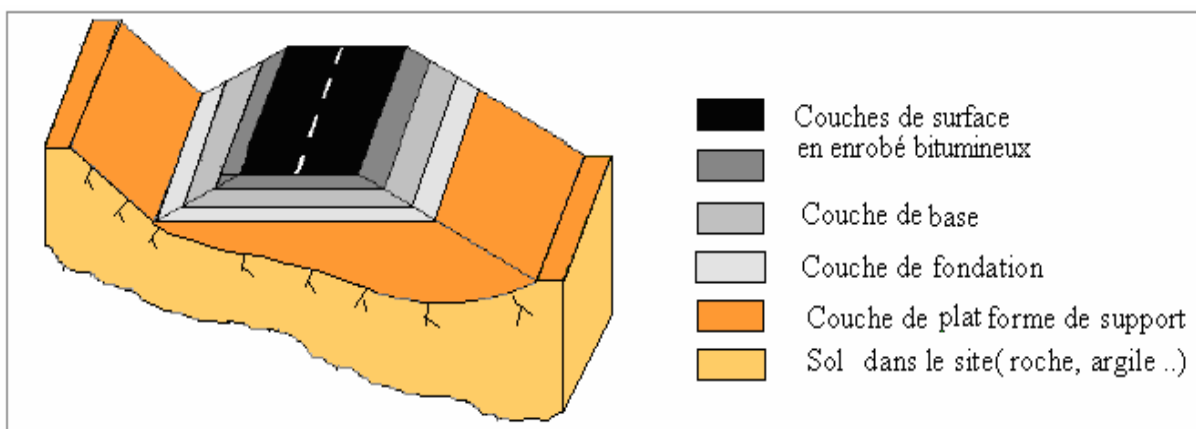


Figure 1.1 : Section d'une chaussée souple

Les méthodes de conception et de dimensionnement des chaussées peuvent être classées en deux catégories. La première est empirique comme la méthode d'AASHTO (Lenngren, 2002). Pour cette méthode, les relations entre les paramètres de conception (par exemple, les charges, les propriétés des matériaux, les configurations des couches et l'environnement...) et les dégradations de la chaussée (l'orniérage, fatigue ...) sont déterminées par les équations empiriques, qui donnent le nombre de cycles de charge jusqu'à la dégradation totale. Elles peuvent être utilisées avec confiance, tant que les limites sont reconnues.

La deuxième catégorie utilise une approche mécanique-empirique. La relation entre les paramètres physiques (contraintes...) et la dégradation est décrite en utilisant des modèles mathématiques, leurs paramètres étant déterminés par des essais. La méthode mécanique-empirique prend en compte les changements de charges et des effets environnementaux. Pour étudier la sollicitation de la chaussée par le trafic, plusieurs méthodes ont été développées à partir des modèles de Boussinesq (1885) et de Burmister (1943, 1945). Ils ont utilisé un système d'une couche ou plusieurs couches élastiques linéaires et homogènes. La méthode de dimensionnement des chaussées utilisée en France est basée sur le modèle multicouche élastique linéaire de Burmister (Duhamel al. 2003). Ce modèle est introduit dans de nombreux codes tels qu'ALIZE. Il s'agit d'un logiciel de calcul et de dimensionnement des chaussées selon la méthode rationnelle (LCPC-SETRA). Cependant, pour la prise en compte du caractère visqueux des couches bitumineuses des développements importants seraient nécessaires (Tran, 2003).

La répétition des charges induit une accumulation des déformations dans les matériaux constituant les chaussées (Gidel, 2001). Les origines des dégradations des chaussées souples sont (Cebon, 1993, Blab, 2002 et Panoskaltsis, 2005) :

- les déformations permanentes (ornières) ;
- les fissures de fatigue ;
- la réduction de l'adhérence pneu/chaussée ;
- l'apparition des fissures causées par les basses températures ;

Ces mécanismes de dégradation sont affectés par plusieurs facteurs, à savoir la structure des chaussées, les propriétés des matériaux, les facteurs environnementaux et les conditions du trafic.

1.2 Dégradation par orniérage

La croissance du trafic lourd accélère l'apparition de la dégradation prématurée notamment l'orniérage (Reddy et al. 1997). L'orniérage constitue la cause principale de dégradation des chaussées souples (Collop et al. 1995, 1997, Archilla et al. 2000 Skok et al. 2002, Zaniewsk et al. 2003 et Haddock, 2005). L'ornière est une dépression longitudinale dans les traces du pneu. Elle s'intensifie à température élevée. La sensibilité des chaussées souples à l'orniérage dépend des caractéristiques des chaussées, de la teneur en liant, du type et de la granulométrie que des granulats et de l'humidité dans les couches inférieures (Archilla et al. 2000, Sousa et al. 1991). La figure 1.2 illustre un exemple d'une chaussée atteinte d'orniérage.



Figure 1.2 : Exemple d'une chaussée atteinte d'orniérage (Chen, 2004)

1.2.1 Mécanismes d'orniérage

L'orniérage résulte des déformations dans la couche de surface ou dans les autres couches (Cebon, 1993, Skok et al. 2002). Plusieurs mécanismes peuvent être à la base de l'orniérage (Sousa et al. 1994). L'orniérage initial est causé par la densification de la chaussée sous le passage des pneus. Cependant, l'évolution de l'orniérage est liée à la déformation de cisaillement (Panoskaltzis, 2005). Cela peut être constaté dans la montée à la surface de la chaussée entre et à l'extérieur du chemin de passage de pneus (bourelet) (Sousa et al. 1994, Olsson et al. 2000). Toutefois, pour les chaussées bien compactées, la contrainte de cisaillement dans la couche de l'enrobé bitumineux constitue le mécanisme principal de l'orniérage (Bahuguna et. 2000 et, Panoskaltzis, 2005 et Bahuguna al. 2006). L'orniérage de la chaussée est causé par trois mécanismes différents (Simpson, 2001, White et al.2002) :

- la déformation plastique permanente verticale dans la couche de surface;
- le fluage latéral dans la couche de surface;
- la déformation des couches inférieures;

Les études réalisées par «The American Association of State Highway Officials » (AASHO) montrent que la déformation de cisaillement est la déformation dominante de formation de la déformation permanente liée à l'orniérage. Des mesures expérimentales aussi bien que des simulations numériques ont montré, que l'orniérage se produit dans l'enrobé bitumineux très près de la surface où la contrainte de cisaillement prédomine (Sousa et al. 1994). Les contraintes de cisaillement induisent trois mécanismes de déformation (Tashman, 2003) :

- Le premier est lié aux mécanismes de frottement entre les granulats enrobés par le bitume. La résistance de friction des granulats est en fonction de la minéralogie, des granulats et des propriétés du liant.
- Le deuxième mécanisme est l'effort excessif sur l'interaction entre les granulats qui est responsable de dilatation de l'enrobé bitumineux. La quantité de dilatation dépend du niveau de confinement, de la gradation granulométrique, des angles et de la forme des granulats (lenticulaires ou sphériques) (Lytton et al, 2003 et Sousa et al, 1994). Sousa et al. (SHRP-A-415, 1994) ont constaté, à partir des résultats expérimentaux et des mesures in situ, que ce mécanisme est le plus important.
- Le troisième mécanisme concerne la liaison entre les éléments du liant (cohésion), et entre le liant et les granulats (adhésion). Il conduit au développement des microfissures

qui adoucissent le matériau sous chargements répétés, menant à l'accélération de la déformation permanente (microfissures).

Le rôle de chacun de ces mécanismes dépend de la structure des chaussées et des caractéristiques des matériaux. Pour les chaussées avec une faible épaisseur d'enrobé bitumineux, le frottement et l'interaction entre les granulats constituent le mécanisme principal. Lorsque l'épaisseur de l'enrobé augmente, la contribution du frottement et d'interaction des granulats diminue et les propriétés rhéologiques du liant jouent un rôle principal pour résister à la décohésion.

1.2.2 Types d'orniérage

Les ornières peuvent être classées en trois niveaux : petites (6 à 12,5mm); moyennes (12,5 à 25mm) et élevés (>25mm) (White et al. 2002).

Toutefois, on signale l'existence de trois types d'orniérage dans les chaussées souples classés en fonction de leur forme, comme illustré dans la figure 1.3 :

- Les ornières d'usure qui sont dues à la perte progressive des particules de granulats de la couche de surface, ce type d'orniérage est causé par la combinaison des facteurs d'environnement et de trafic.
- Les ornières d'instabilité qui sont dues au déplacement latéral des matériaux dans la couche de l'enrobé bitumineux. Elles sont importantes pour des chaussées ayant des couches de surface de mauvaises caractéristiques.
- Les ornières structurelles qui sont dues à la déformation verticale permanente dans les couches inférieures.

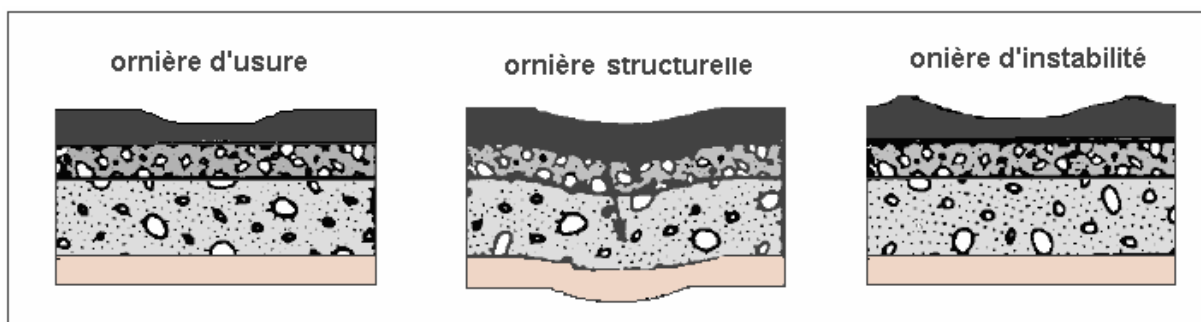


Figure 1.3 : Types d'ornières dans les chaussées souples (White et al. 2002)

1.2.3 Facteurs influençant l'orniérage

Les facteurs affectant l'orniérage sont classés en deux catégories. Les facteurs internes comme les propriétés des matériaux de la structure des chaussées et les facteurs extérieurs comme le trafic et l'environnement.

Structure de chaussée

Le niveau des contraintes dans une chaussée constitue un facteur majeur dans le mécanisme d'orniérage. Il dépend de l'épaisseur de la chaussée et de l'amplitude du chargement (Gillespie et al. 1993). Pour les chaussées de faible épaisseur, un défaut de compactage de plate-forme support accélère l'orniérage. La déformation permanente dépend aussi de l'épaisseur de la couche de surface. Dans le cas d'une couche mince, on a une distribution du chargement mauvaise, ce qui induit de fortes contraintes dans la couche d'assise, qui produisent ainsi des déformations permanentes (Ekdahl, 1999). Ces déformations conduisent à l'orniérage d'instabilité. La figure 1.4 présente l'influence de l'épaisseur de la couche de surface sur la déformation verticale au dessus de la couche de base et de plate-forme support (Ekdahl, 1999) (essai de plaque de chargement : $r = 150\text{mm}$, $\sigma = 0.8\text{MPa}$). On note que les couches minces de surface affectent le niveau de déformation dans les couches inférieures. Sebaaly (1992) et Stolarski. (1999) ont montré que l'influence de la pression de gonflage est modérée dans les couches d'enrobé bitumineux épaisses (plus de 150cm).

Les performances d'une chaussée sont contrôlées par les propriétés du liant bitumineux qui se comporte comme un fluide visqueux à des températures élevées et/ou des taux de chargement long. A noter que ces propriétés visqueuses du liant sont à l'origine physique des déformations permanentes (Heck, 2001, Corté et Di Benedetto, 2005). L'utilisation des liants plus durs et moins susceptibles à la température diminue considérablement les risques d'orniérage (Corté et al. 1997, Desmoulin et al. 2005). Perret et al. (2001, 2003) ont montré que l'enrobé bitumineux à haut module a une forte résistance à l'orniérage. Les résultats expérimentaux montrent que la résistance de l'enrobé bitumineux à la déformation permanente, par conséquent la résistance à l'orniérage, augmente en utilisant un traitement par la chaux ou le caoutchouc (Ali et al. 2005) ou le polymère (Xu et al. 2004 et Zubeck et al. 2002). L'orniérage structural diminue en utilisant la stabilisation des couches inférieures de la chaussée par du ciment, de la chaux (Mallela, 2004). Romanoschi et al. (2004) ont montré que

l'utilisation de bitume dans les couches inférieures réduit les contraintes et les déformations dans la chaussée et par conséquent l'orniérage. De plus, l'utilisation de « geogrid » et « geosynthetics » conduit à une répartition plus uniforme des charges et par conséquent à une réduction de la profondeur de l'ornière (Fannin et al. 1996, Wasage et al. 2004, Saad et al. 2006).

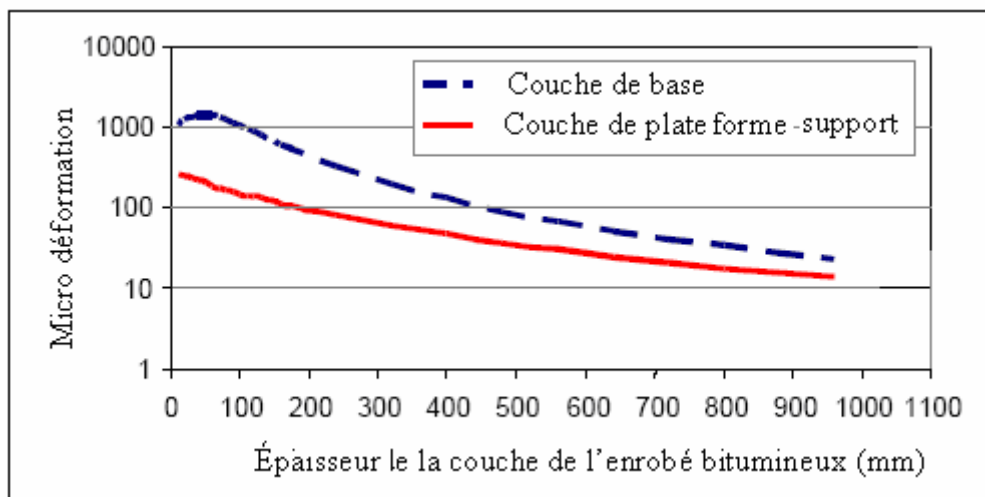


Figure 1.4 : Influence de l'épaisseur de la couche de surface sur la déformation verticale au dessus de la couche de base et de plate-forme support (Ekdahl, 1999)

Facteurs liés au trafic

Le passage des véhicules induit des contraintes qui peuvent conduire à des déformations permanentes dans les chaussées et à l'orniérage. On donne ci-dessous une présentation des paramètres du trafic qui influencent l'orniérage:

A- Charge par essieu

Le passage de véhicules entraîne des déformations élastiques, plastiques et visqueuses dans la chaussée. Les charges élevées causent des déformations permanentes, qui entraînent des ornières dans la chaussée. Bonaquist et al. (1989) ont montré que la déformation longitudinale à la base de la couche de surface augmente de 200 à 400% en augmentant la charge de 42 à 86 kN (Ekdahl, 1999). Gillespie et al. (1993) ont observé une variation linéaire entre l'intensité de la charge du pneu et l'orniérage. Ils ont signalé que les dommages causés ne dépendent pas seulement du poids du véhicule, mais également de la configuration des charges transmises à la chaussée. Pierre et al. (2003) montrent que les contraintes causées par la charge du pneu d'un véhicule lourd est le facteur majeur qui réduit la vie des chaussées

souples. Les mesures faites au laboratoire voies et circulation de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (LAVOC) par Perret et al. (2001) montrent que l'augmentation de la charge de 8 à 11,5 tonnes (pression de gonflage = 800 kPa, température = 30°C) induit une augmentation de 43% de la déformation longitudinale en bas de la couche de surface.

B- Configuration des essieux

Trois configurations d'essieux sont utilisées : essieu simple; tandem et tridem. Le nombre et l'espacement d'essieux sont des facteurs déterminants pour la transmission des charges à la chaussée. L'augmentation du nombre d'essieux réduit la charge transmise à la surface de la chaussée à charge égale (Stolarski, 1999). Un essieu simple produit plus d'endommagement qu'un essieu tandem (Kim, 2005). Egalement, un essieu tridem produit moins d'endommagement qu'un essieu tandem. La figure 1.5 illustre l'influence de la configuration d'essieux et l'épaisseur des couches de surface sur la profondeur de l'orniérage. Hajek et al. (1990) ont montré qu'une augmentation de l'espacement d'essieux semble réduire l'endommagement des chaussées souples (Stolarski, 1999). Contrairement à cette nuance, Gillespie (1994) a signalé que l'espacement d'essieux n'a pas d'influence sur l'orniérage des chaussées souples. La norme AASHTO stipule que l'effet d'espacement d'essieux augmente avec la rigidité des chaussées (Stolarski, 1999)

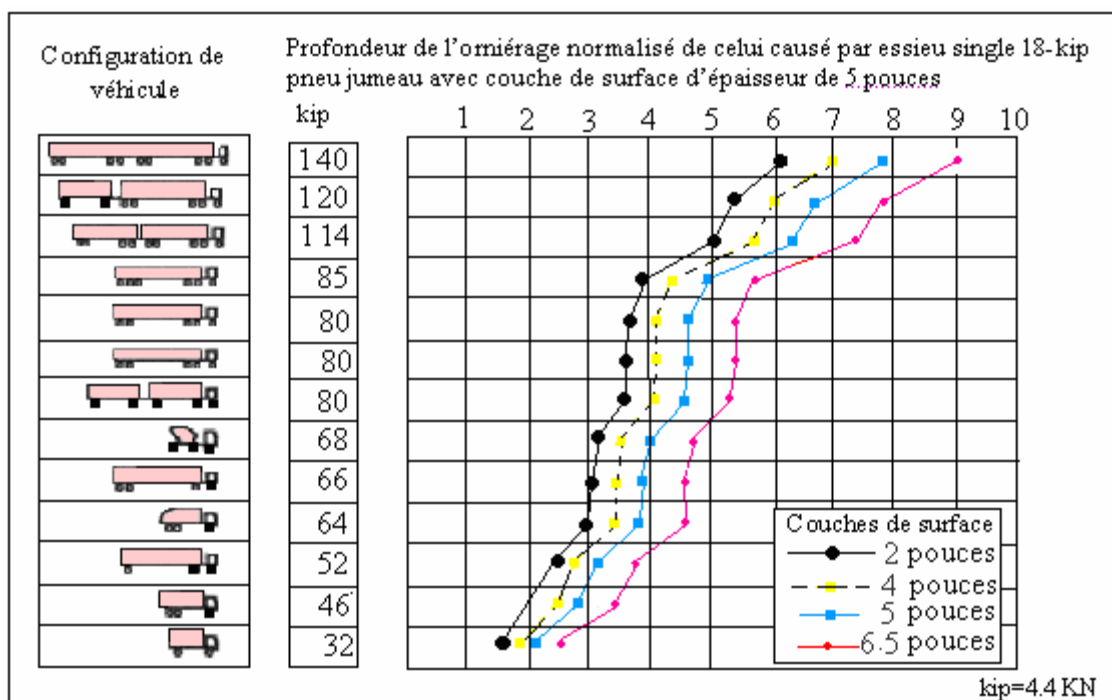


Figure 1.5 : Influence de l'épaisseur des couches de surface et de la configuration d'essieu sur la profondeur d'orniérage (Gillespie et al. 1994)

C- Type de pneus

La réponse de la chaussée est également affectée par le type de pneus. Cebon (1993) et Kim et al. (2005) ont indiqué que des pneus single produisent plus d'orniérage que les pneus jumeaux. Le pneu super single, récemment apparu, a une largeur entre 400 et 460 mm. Il dépasse de 250 à 305 mm la largeur d'un pneu simple (Stolarski, 1999). La surface de contact du pneu super single est moins importante que celle du pneu jumeau. Il en résulte une réduction de la résistance au roulement et une réduction de la consommation de carburant (Bonaquist, 1992). La réduction de la surface de contact est accompagnée par une augmentation de la contrainte de contact par conséquent l'ornière s'intensifie notamment avec des couches moins épaisses.

Les essais réalisés par Al-Qadi et al. (2002) ont montré que la contrainte verticale pour des pneus super singles est plus élevée que pour des pneus traditionnels (simple), mais la différence entre l'amplitude de contrainte des deux types de pneus diminue avec la profondeur de la structure et devient négligeable à la surface de la couche de plate-forme de support (pour une couche bitumineuse épaisse).

D- Pression de gonflage

Bonaquist et al. (1989) ont examiné deux sections des chaussées avec la même structure en réalisant les essais à différentes pressions de gonflage. Ils ont conclu que la pression de gonflage a peu d'effet sur l'orniérage. Ils ont trouvé qu'une augmentation de la pression de gonflage de 524 kPa à 965 kPa induit une augmentation de la déflexion à la surface de 2 à 10% pour une couche de surface de 178 mm d'épaisseur.

Archilla et al. (2001) ont trouvé que l'augmentation de la pression de gonflage induit une augmentation des contraintes de compression verticale de 40% à proximité de la surface de la chaussée. Cette augmentation induit un plus haut risque de déformations plastiques dans les couches de la chaussée et par conséquent l'appariation d'orniérage. La figure 1.6a donne la distribution de la contrainte verticale en fonction de la pression de gonflage et la charge par essieu (Archilla et al. 2001). On note que la déformation augmente avec l'augmentation de la pression de gonflage. On constate également que les couches de surface sont plus sensibles à la pression de gonflage que la couche de support. En conséquence, la pression de gonflage a une influence sur l'orniérage d'instabilité. L'étude de Perret et al. (2001, 2003) montre, pour

une chaussée de 170 mm d'enrobé bitumineux, que l'augmentation de la pression de gonflage de 17% fait augmenter la déformation de la couche de surface de 8%. Sebaaly et al. (1992) ont montré qu'une augmentation de la pression de gonflage a un faible effet pour les chaussées souples épaisses, mais un effet important pour les chaussées minces.

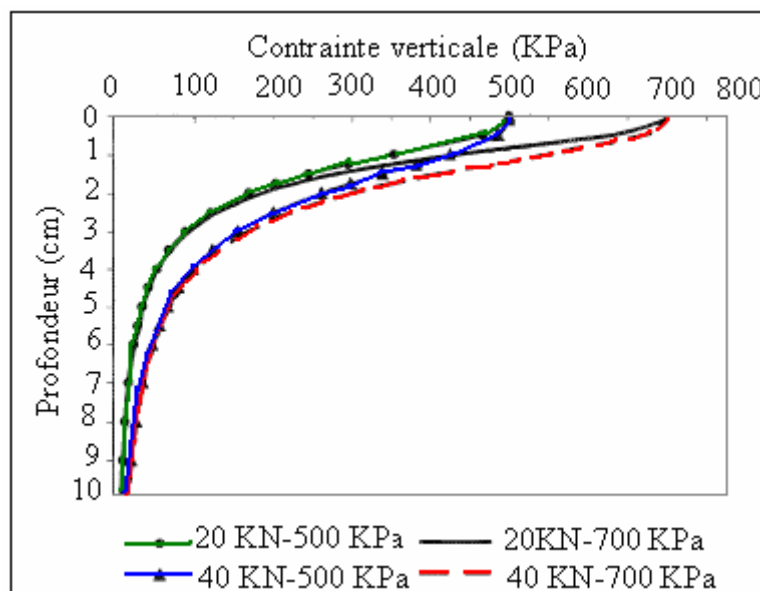


Figure 1.6b : Influence de la pression de gonflage et de la charge par essieu sur la contrainte verticale (Archilla et al. 2001)

E- Vitesse de circulation

La dégradation de la chaussée augmente avec la réduction de la vitesse de circulation (Al-Qadi et al. 2004). Une vitesse de circulation faible (notamment sur l'intersection en milieu urbain) conduit à une augmentation du temps de chargement et par conséquent à une augmentation du risque d'orniérage. La vitesse de circulation a un effet significatif sur les contraintes longitudinales et transversales en dessous de la couche de surface et la contrainte verticale au dessus de plate-forme support. Quand la vitesse du véhicule décroît de 105 km/h à 32 km/h les contraintes longitudinales transversales en dessous de la couche de la surface augmentent de 30%, et la contrainte verticale au dessus de la plate-forme support augmente de 15% (Wang et al. 2004). La figure 1.7a illustre l'influence de la vitesse de circulation sur la déformation longitudinale en dessous de la couche de surface (Brown, 1997).

Le module des matériaux bitumineux dépend de la fréquence de sollicitation. La fréquence à utiliser est liée à la vitesse à laquelle la charge se déplace. La figure 1.7b présente le développement de module E^* en fonction de la fréquence. Perret (2003) a montré que le

module de la couche de surface (HMT 22s : enrobé à chaud pour couche de base selon SN_640431) varie fortement avec la température.

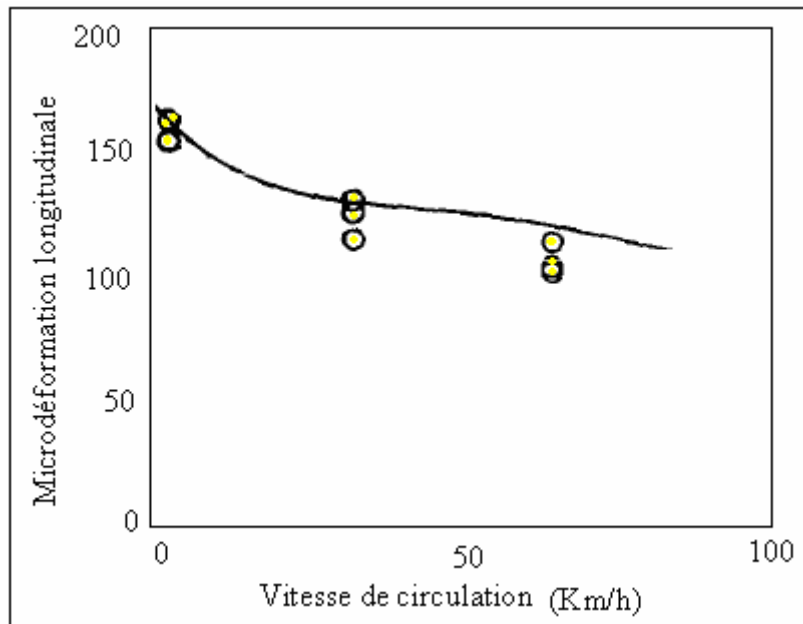


Figure 1.7a : Influence de la vitesse de circulation sur la déformation longitudinale en dessous de la couche de surface (Brown, 1997)

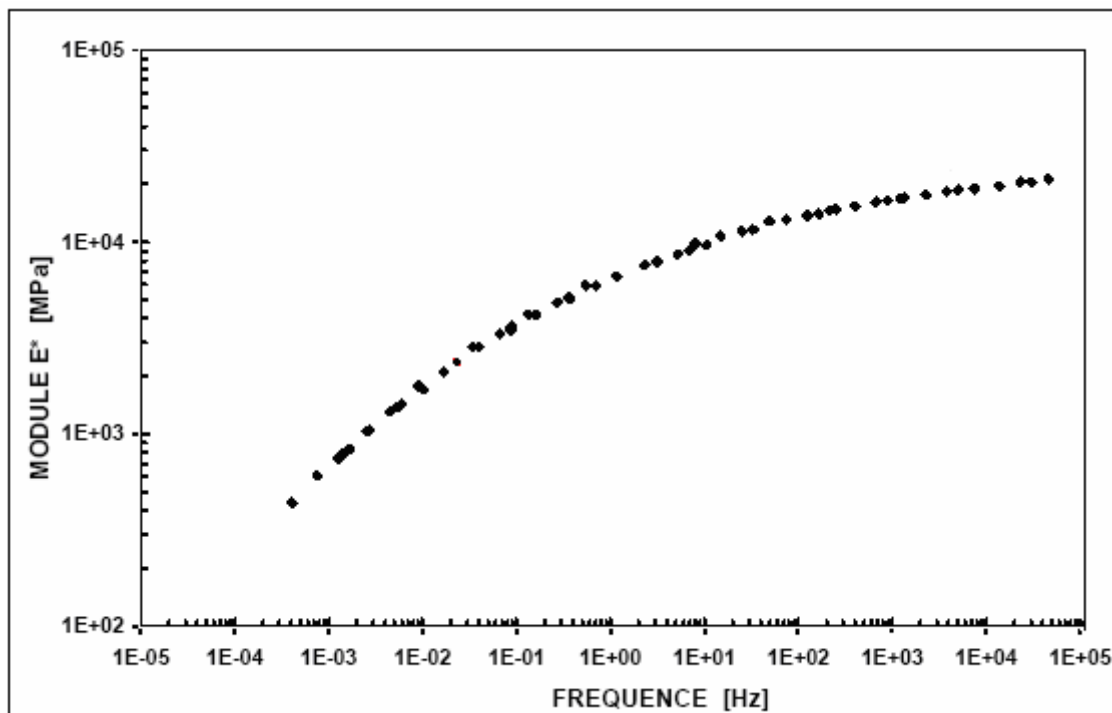


Figure 1.7b : Influence de la fréquence sur le module E^* de l'enrobé bitumineux (Perret, 2003)

F- Déplacement transversal

Le déplacement transversal est défini comme la distribution de la charge du pneu dans la direction transversale d'une chaussée. La largeur de la section chargée de la chaussée s'étend et alors l'orniérage décroît. Les essais accélérés montrent que le taux de dégradation des chaussées est plus élevé pour les circulations étroites (Yandell et al. 1999). Sousa (1991) et White et al. (2002) ont montré que la distribution transversale du pneu influence la profondeur et la forme de l'orniérage (figure 1.8a). Un déplacement transversal de 26 cm réduit l'orniérage de 32% (White et al. 1999).

La figure 1.8b illustre l'influence du déplacement transversal sur la forme de l'orniérage (White et al. 2002). Si le chargement est appliqué avec des pneus jumeaux sans déplacement transversal, le trafic produit une élévation (bourrelet) significative entre et à l'extérieur des pneus. Le déplacement transversal des pneus réduit d'une manière significative l'orniérage et le bourrelet (compression du bourrelet entre les pneus).

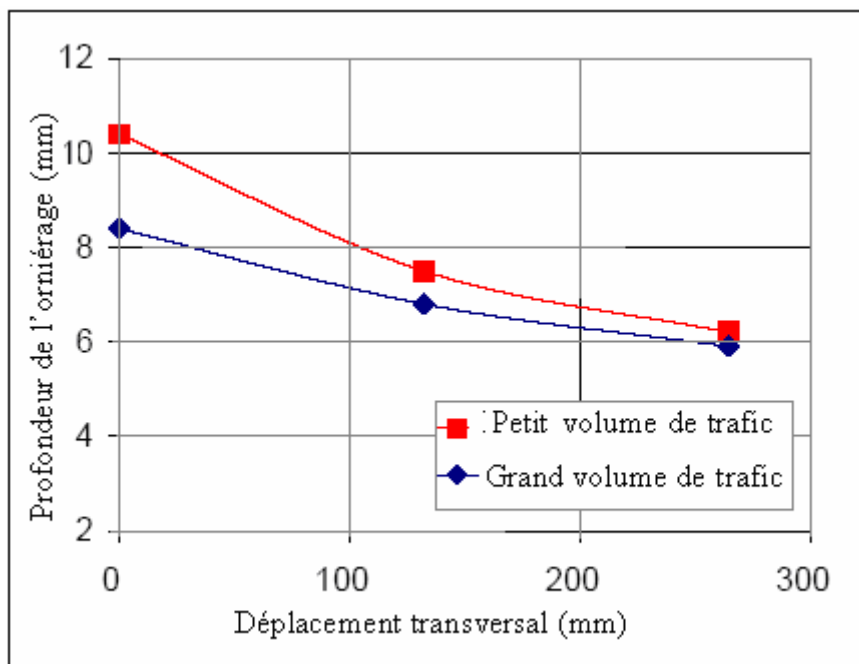


Figure 1.8a : Influence du déplacement transversal sur la profondeur de l'orniérage (White et al. 2002)

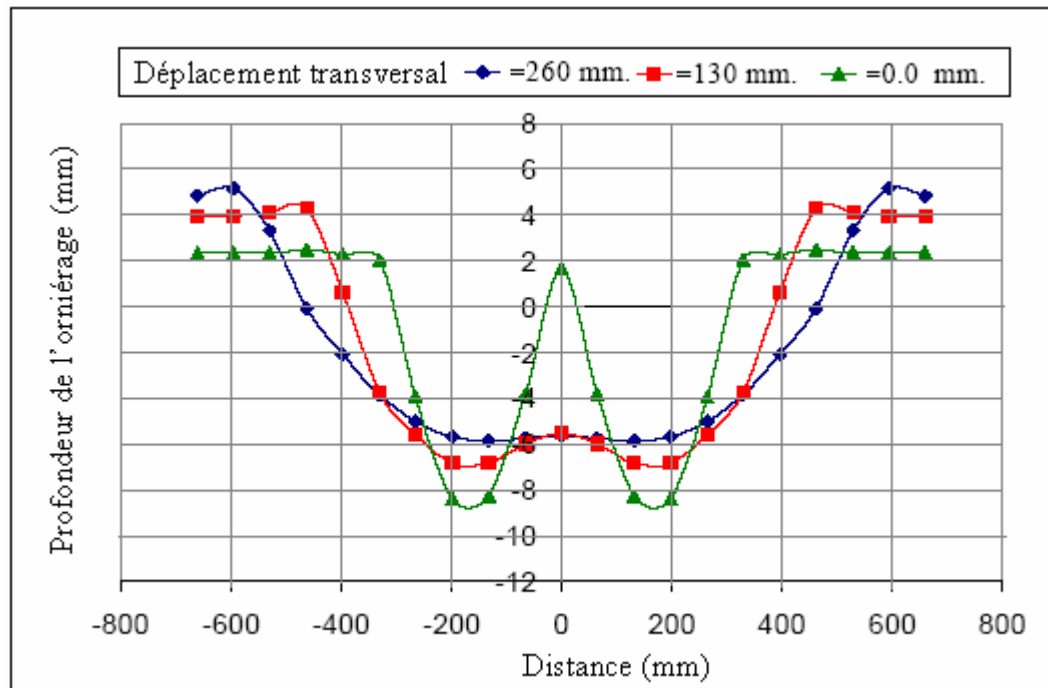


Figure 1.8b : Influence du déplacement transversal sur le profil de l'orniérage (White et al.2002)

Facteurs environnementaux

Les matériaux bitumeux à des températures froides ont des modules de déformation importants et une bonne résistance à la déformation. Lorsque la température croît, le module diminue et le risque de déformations permanentes augmente. Par conséquent, le risque d'orniérage est élevé en été (Masada et al. 2004). La variation de la température peut entraîner des contraintes et des déformations au sein des matériaux en raison des contractions-dilatations thermiques (Corté et Di Benedetto, 2004). L'augmentation de la température de 5 à 30°C dans les couches d'enrobé bitumineux, induit une augmentation de 145% de la déformation longitudinale en bas de ces couches ; 59% de la déformation verticale au sommet de la couche de support et 84% de la déflexion de la surface de la couche de roulement (charge par essieu de 11,5 tonnes et 800 kPa de pression de gonflage, Perret et al. 2001). La figure 1.9.a illustre le développement de la déformation en fonction de la température pour plusieurs vitesses de circulation.

Le risque de déformations permanentes est élevé dans la couche d'assise pendant le printemps (Masada et al. 2004). En effet la teneur en eau affecte les modules de ces couches. Krarup (1994) a observé que les modules de déformation des couches non liées diminuent de 35 à 40% avec la saturation. Werkmeister et al. (2003) ont montré que le risque d'orniérage augmente fortement avec l'augmentation de l'humidité. La Figure 1.9b présente l'influence de la variation saisonnière de la température et de la teneur en eau sur le développement de

l'orniérage (White, 1999). On peut constater que l'orniérage se propage en deux phases, la première est liée à l'augmentation de la teneur en eau (pendant le printemps), alors que la seconde est liée à la température (pendant l'été).

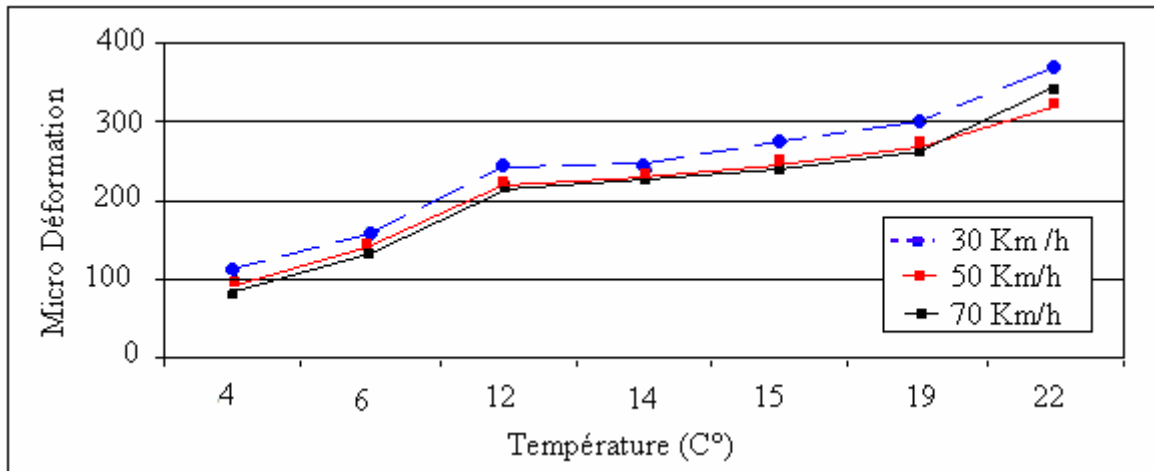


Figure 1.9a : Déformation de la couche de surface en fonction de la vitesse de circulation et de la température de la couche de surface (Ekdahl, 1999)



Figure 1.9b : influence de variations saisonnières sur l'orniérage (White, 1999).

1.2.4 Méthodes d'évaluation de l'orniérage de la chaussée souple

Plusieurs méthodes ont été proposées pour évaluer le comportement des chaussées vis-à-vis de l'orniérage. Elles ont été développées à partir :

- Un traitement statistique des ornières qui relie le volume du trafic à la déformation maximale à la surface de la couche de support,
- Des essais accélérés en laboratoire ou in situ.

Méthodes statistiques

Différents modèles ont été proposés dans la littérature pour évaluer le comportement des chaussées à l'orniérage. Une première catégorie donne le nombre limite de cycle de passage (N_f) pour limiter la déformation permanente (ε_v) au sommet de la couche de sol.

Claussen et al. (1977) ont proposé une expression à partir des résultats de l'essai d'AASHO :

$$N_f = 6,15 \times 10^{17} (\varepsilon_v)^4 \quad (1.1)$$

N_f : nombre permis des cycles de passage,

ε_v : Déformation verticale au sommet de la couche de support.

Brown et al. (1978) ont utilisé une base de données des routes en Grande-Bretagne pour développer une expression qui donne le nombre limite de passage :

$$N_f = 3 \times 10^{15} (\varepsilon_v)^{3.57} \quad (1.2)$$

Les deux méthodes proposées donnent une différence de 40% sur N_f .

La deuxième catégorie donne l'ornière ou son taux (\log_R) en fonction du nombre d'essieux simples équivalents (ESAL) N_{18} .

Finn et al. (1986) ont développé un modèle pour l'orniérage en utilisant les résultats des essais d'ASSHO. Ils donnent le taux de l'orniérage pour les chaussées plus ou moins épaisses en utilisant le nombre d'essieux simples équivalents (ESAL) et la contrainte de compression. Pour des couches de surface ayant une épaisseur ≥ 152 mm.

$$\log_R = -1,173 + 0,717 \log d - 0,685 \log(N_{18}) - 0,666 \log(\sigma_c) \quad (1.3)$$

Pour des couches de surface de moins de 152 mm.

$$\log_R = -5,617 + 4,343 \log d - 0,16 \log(N_{18}) - 1,118 \log(\sigma_c) \quad (1.4)$$

d : déflexion de la surface de la chaussée (10^{-3}) sous une charge de 40 kN,

N_{18} : nombre équivalent d'essieu simple de 18 kN,

σ_c : Contrainte de compression à l'interface de la couche d'enrobé bitumineux (couche de base ou couche de sol de support).

\log_R : taux d'orniérage par répétition d'essieu.

Chen (Dar-Hao) et al. (2001) ont amélioré le modèle de Finn et al. (1986) pour évaluer le développement de l'orniérage en utilisant le paramètre du modèle de Finn :

$$\log_R = -7,724 + 1,151 \log d - 0,486 \log(N_{18}) - 1,260 \log(\sigma_c) \quad (1.5)$$

Essais accélérés

Les essais accélérés permettent d'appliquer plusieurs intensités de charges par essieu avec différentes pressions de gonflage. Ils permettent d'analyser séparément l'effet de facteurs principaux sur les performances de la chaussée. L'accélération de l'orniérage peut être réalisée de différentes manières :

- augmenter le nombre de cycles de chargement ;
- augmenter l'intensité de la charge ;
- employer une configuration particulière pour l'application de la charge ;
- changer les conditions climatiques.

Les essais accélérés en laboratoire « Asphalt Pavement Analyzer » (APA), « Hamburg Wheel Rut Tester » (HWRT) et « French Laboratory Rutting Tester » (FLRT) sont considérés satisfaisants pour l'obtention d'une évaluation raisonnable de la performance des chaussées et d'une bonne corrélation avec des chaussées en service (Uzarowski et al. 2004).

Les essais accélérés in situ permettent de réaliser des essais sur une chaussée restructurée à l'échelle réelle. Un simulateur du trafic est utilisé. Des années du vrai trafic peuvent être simulées quelques semaines. Les essais accélérés peuvent être réalisés avec des machines transportables sur site réel (Heavy Vehicle Simulator : HVS) ou sur des chaussées en laboratoire avec des conditions contrôlées comme l'essai accéléré du LCPC à Nantes et de CEDEX à Madrid. Certains contrôlent la température pendant les essais (Halle Fosse au LAVOC à Lausanne).

1.3 Modèles proposés pour les chaussées

1.3.1 Modèles pour l'enrobé bitumineux

La structure de l'enrobé bitumineux est complexe en raison de la distribution non-uniforme de ses constituants (granulats, bitume, vides). La forme, la taille et les propriétés mécaniques des granulats sont variées. Le liant est un matériau élastique, visqueux et plastique. Bien que les vides ne possèdent aucune force mécanique appréciable, leur distribution et leur nombre influencent d'une manière importante la réponse globale de l'enrobé bitumineux (Masad et al. 2003).

La déformation totale d'enrobé bitumineux s'écrit (figure 1.10) (Bahuguna et al. 2000, Chehab 2002) :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{ve} + \varepsilon^{vp} \quad (1.7)$$

ε^e = déformation élastique

ε^p = déformation plastique

ε^{ve} = déformation viscoélastique

ε^{vp} = déformation viscoplastique

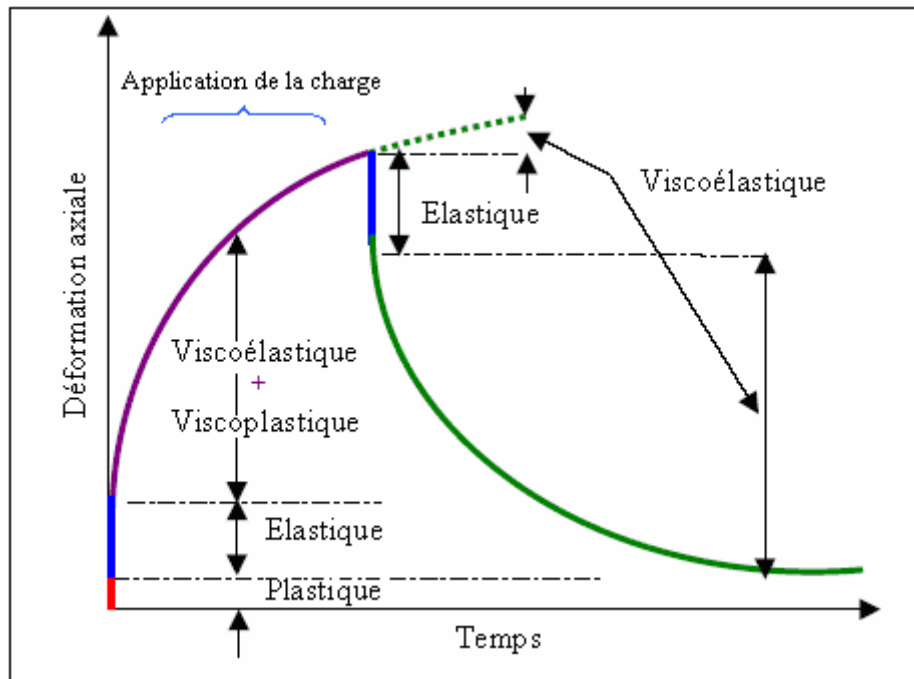


Figure 1.10 : Composantes de la déformation dans l'enrobé bitumineux

La contribution relative de chaque composante de la déformation totale de l'enrobé bitumineux dépend de la température et du taux de chargement.

Uzan (1996) a prouvé que l'orniérage arrive d'habitude pendant un été très chaud (température de 47°C) combiné à des charges de trafic importantes. Il est lié principalement à la déformation viscoplastique, tandis que la composante viscoélastique contribue très légèrement à ce phénomène (Chehab, 2002). La réponse viscoélastique gouverne la réponse du mélange aux températures intermédiaires/aux taux élevés de déformation (Chehab, 2002).

Les chercheurs ont utilisé différents modèles pour modéliser l'enrobé bitumineux. Dans les 40 dernières années, la majorité des modèles proposés pour analyser l'enrobé bitumineux

sont basées sur le comportement viscoélastique. Cependant, peu de travaux ont été réalisés pour la modélisation des déformations permanentes (Bahuguna, 2006).

Plusieurs chercheurs ont essayé de modéliser la déformation permanente en utilisant un modèle viscoélastique. Sousa et Weissman (1994) ont développé un modèle viscoélastique non-linéaire avec endommagement pour la déformation permanente de l'enrobé bitumineux. Ce modèle permet de déterminer la déformation permanente d'un cycle charge-décharge mais il ne permet pas d'évaluer l'évolution de la déformation plastique cumulée. Le modèle a été ensuite enrichi en 1995 en incluant une composante élastique-plastique.

Lytton et al. (2003) ont proposé un modèle pour prédire l'orniérage. Ce modèle est une combinaison d'un modèle plastique classique et d'une relation empirique (à partir des mesures expérimentales). Les modèles de Sousa et al. (1995) et Lytton et al. (2003) ne peuvent pas prendre en compte l'accumulation de la déformation permanente avec la répétition des charges (Bahuguna, 2006).

La théorie de Perzyna a été utilisée avec succès pour la modélisation de la déformation permanente. Florea (1995a, b), Lu et al. (1998), Scarpas et al. (1997) et Seibi et al. (2001) ont utilisé cette théorie pour développer un modèle élasto-viscoplastique isotrope pour l'enrobé bitumineux. Ils ont utilisé une surface d'écoulement associée ou non-associée pour prédire la déformation viscoplastique. Olsson et al. (2000) ont utilisé une surface d'écoulement de Drucker-Prager avec une loi de fluage simple pour modéliser le comportement de l'enrobé bitumineux. L'intérêt de ce modèle est sa simplicité, ses paramètres sont déterminés à partir d'une série d'essais de fluage.

Huang et al. (2002) ont développé un modèle thermo-viscoplastique qui intègre la température et le taux de chargement dans le modèle de plasticité développé par Desai et al. (1986). Le modèle est capable de représenter différents comportements de l'enrobé bitumineux (la plasticité, la dépendance de la température et le taux de chargement). Le modèle utilise un écrouissage isotrope à plasticité associée. Une série d'essais triaxiaux et de fluage a été réalisée pour calibrer et vérifier ce modèle.

Schwartz et al. (2002) et Chehab (2002) ont développé un modèle fondé sur la formule d'endommagement de Shapery. Ce modèle prend en compte les différents comportements de l'enrobé bitumineux : l'endommagement et les composantes viscoélastique et viscoplastique.

Ils ont montré que le principe de superposition temps-température peut être utilisé en grandes déformations associées aux températures élevées.

Tashman et al. (2005) ont développé un modèle anisotrope viscoplastique avec endommagement pour décrire les déformations permanentes. Ils ont utilisé la théorie de Perzyna et de Drucker-Prager pour le comportement viscoplastique.

De nombreux chercheurs ont souligné l'importance de développer des procédures d'essais pour déterminer les paramètres des modèles (Sousa et al. 1994, Cela, 2002). Massad a montré que l'essai triaxial est le plus approprié, pour sa simplicité et sa capacité à reproduire un état de contrainte à l'origine de l'orniérage (Scarpas et al. 1997). De nombreux chercheurs ont noté l'importance de l'endommagement dans le comportement de l'enrobé bitumineux (Schapery, 1982, 1995, Sousa et al. 1994, Kim et al. 1997, Scarpas, 1997, Lee et al. 2000, Schwartz, 2002, Collop et al. 2003, Tashman, 2003, Chehab et al. 2005, Tashman et al. 2005).

1.3.2 Modèles rhéologique pour les couches inférieures

Les couches inférieures sont composées de graves et de sol qui ont un comportement complexe. Le comportement des éléments de ces couches dépend de l'état de contrainte et du degré de saturation. La granulométrie, l'humidité et la forme des granulats ont une influence significative sur le comportement mécanique des couches de graves non traités. Plusieurs modèles ont été utilisés pour décrire le comportement des couches d'assise : élastique linéaire ; élastique non-linéaire ou élasto-plastique.

White et al. (2002) ont utilisé un modèle élastique pour décrire les couches inférieures afin d'analyser la contribution de ces couches à l'orniérage. Cependant, l'analyse élastique linéaire n'est pas convenable pour les couches inférieures des chaussées. Plusieurs modèles élastiques non-linéaires ont été proposés pour décrire la réponse de matériaux granulaires comme le modèle $K-\theta$ ou encore le modèle d'Uzan. Tutumluer (1998) a développé un modèle pour le comportement élastique des couches de granulats. Il prend en compte le comportement non-linéaire des granulats. Olsson et al. (2000) ont utilisé un modèle élasto-plastique avec une surface d'écoulement de Mohr-Coulomb pour représenter le comportement des couches d'assise en analysant les comportements des chaussées à l'orniérage. Saleh et al. (2003) ont analysé les réponses des chaussées en utilisant un modèle élasto-plastique avec une

surface d'écoulement de Drucker-Prager. Dans cette analyse, ils ont ignoré l'influence des couches d'enrobé bitumineux sur le développement de l'orniérage.

1.3.3 Modélisation de la charge du pneu

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.

Blab (1999) a confirmé que l'utilisation d'une géométrie circulaire de l'empreinte est insuffisante. La figure 1.11a 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 :

$$A_c = \pi(0,3L)^2 + (0,4L)(0,6L) = 0,5227L^2 \quad (1.8)$$

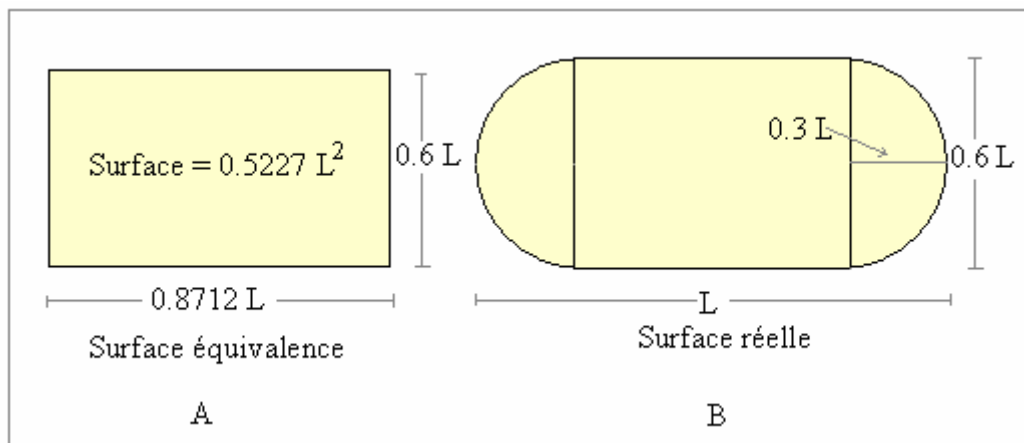


Figure 1.11a : Simplification de la surface de contact d'un pneu (Huang, 1993)

Il y a une différence significative entre la section déterminée par l'équation et l'empreinte réelle qui prend en compte l'effet des bandes de roulement du pneu (figure 1.11b).



Figure 1.11b : Photo de l'empreinte du pneu super single de Michelin 385/65R22 avec une charge par essieu de 8 tonnes et une pression de gonflage de 800 kPa (Perret, 2003)

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. Blab (1999) a conclu que le ratio largeur/longueur pour un pneu Goodyear 11R22.5 (pneu simple) reste moins de 1 pour une faible charge d'essieu et diminue rapidement en dessous de 1 quand la charge augmente. Pour le pneu super single, on peut remarquer que le ratio largeur/longueur reste au dessus de 1 avec le changement de pression de gonflage contrairement au changement de charge. Ce rapport dévie légèrement de 1 pour la pression de gonflage pour les deux pneus. Les figures 1.12a et 1.12b montrent le changement du rapport largeur/longueur pour différents types de pneus en fonction de la charge par essieu et de la pression de gonflage.

Pour la simplification d'un pneu super single (425/65R22.5), une étude de Michelin (1997) propose un rapport de largeur/longueur de 1:0.85. Les essais réalisés au LAVOC montrent que le ratio largeur/longueur est fortement lié à la charge du pneu super single (1 pour 11,5 tonnes à 1,22 pour 8 tonnes avec 800 kPa). Les résultats montrent également que l'influence de pression de gonflage est faible sur le rapport largeur/longueur (1,06 pour 800 kPa à 0,98 pour 600 kPa pour une charge de 11,5 tonnes).

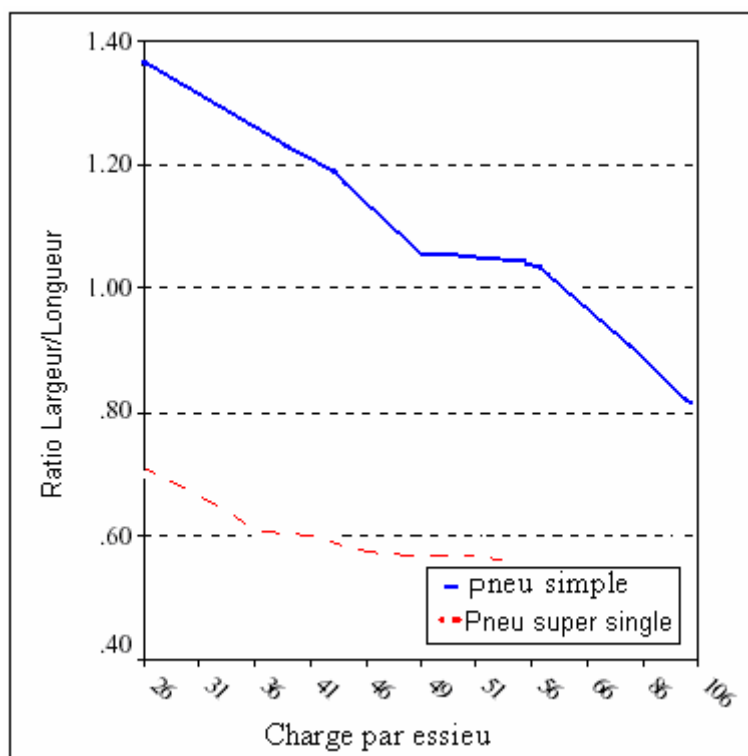


Figure 1.12a : Influence de la charge par essieu sur le ratio largeur/longueur pour plusieurs types du pneu (Blab, 1999)

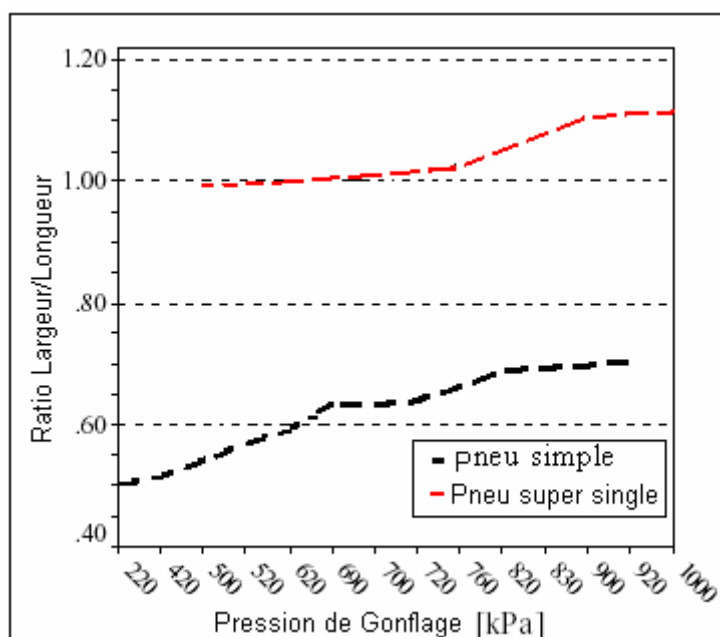


Figure 1.12b : Influence de la pression de gonflage sur le ratio largeur/longueur pour plusieurs types de pneu (Blab, 1999)

D'autre part, la forme affecte la quantité et la direction des déformations et des contraintes principales en dessous de la couche d'enrobé bitumineux (qui dans la plupart des modèles de dégradation sont liées à la fissure de fatigue) (Blab, 1999). La contrainte de

tension maximale pour le pneu super single se produit dans la direction longitudinale alors que les fissures de fatigue s'initient dans la même direction.

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.

A partir des mesures, De Beer (1997) a montré que l'application de la charge du pneu sur la surface de la chaussée produit une contrainte verticale, une contrainte transversale et longitudinale due à l'accélération, la décélération, la montée ou la descente du véhicule. La contrainte longitudinale correspond à la résistance au roulement du pneu (elle est plus faible pour les pneus super single). Par contre la contrainte verticale a une influence plus significative sur la réponse des chaussées (Kim et al. 2005).

Dans les méthodes de conception des chaussées, même par éléments finis (Kim et al. 2005), il est généralement supposé que la pression de contact est statique et égale à la pression de gonflage (Park et al. 2005). Blab (1999) a indiqué que la pression verticale de contact moyenne réelle est inférieure à celle de gonflage. Des ratios pression de contact moyenne/pression de gonflage supérieurs à 1 ont été obtenus, mais uniquement pour des pneus faiblement gonflés. Ce ratio tend à diminuer lorsque la pression de gonflage des pneus augmente. Plusieurs équations ont été proposées pour déterminer la surface et la pression de contact (Luo et al. 2005). De Beer (1997) a proposé l'équation suivante pour estimer la contrainte verticale moyenne de contact.

$$q = k_1 + k_2 p_t + k_3 F_z \quad (1.9)$$

Où q est le contrainte verticale moyenne (kPa), F_z est la charge appliquée (kN), p_t est la pression de gonflage du pneu, $K_{1,2,3}$ sont des constantes.

De Beer et al. (1997), Hua et al. (2002), Fang et al. (2004), Kim et al. (2005) ont montré que la contrainte verticale de contact n'est pas uniforme. La figure 1.12.c montre le changement de la pression de contact sur les bandes de roulement.

Blab (1999) a confirmé que la distribution de la contrainte verticale est non uniforme sur l'empreinte du pneu et des pics de contrainte (1,5 à 3 fois plus importants que la contrainte verticale moyenne calculée) se produisant même sous faible pression de gonflage.

De Beer et al. (1997) ont prouvé que la contrainte verticale est affectée par le type de pneu. Ils ont indiqué que l'utilisation de la contrainte uniforme et égale à la pression de gonflage pour la prévision du service de la chaussée en Afrique du Sud n'est pas exacte. De Beer (1997) a montré que la charge du pneu n'affecte pas fortement le développement de la contrainte verticale de la zone centrale de l'empreinte du pneu contrairement aux zones extérieures de l'empreinte (figure 1.12c). Blab (1999) a étudié en détail le non uniformité de la pression de contact de l'empreinte du pneu. Il a divisé l'empreinte en deux zones extérieures (40% de la surface totale) et une zone centrale (60% de la surface totale). Il a conclu que la charge n'affecte pas fortement le développement des contraintes de contact vertical vers le centre du pneu. Blab (1999) montre que l'influence de la pression de gonflage du pneu affecte fortement la contrainte de la zone centrale. Si la charge appliquée reste constante et la pression de gonflage du pneu augmente de 50%, la contrainte moyenne au centre q_c de l'empreinte augmente d'environ 27-45% selon le type de pneu. Pour la contrainte moyenne des zones extérieures de q_e , il a trouvé qu'une augmentation de 50% de la charge appliquée du pneu produit une augmentation entre 27 et 35% de q_c .

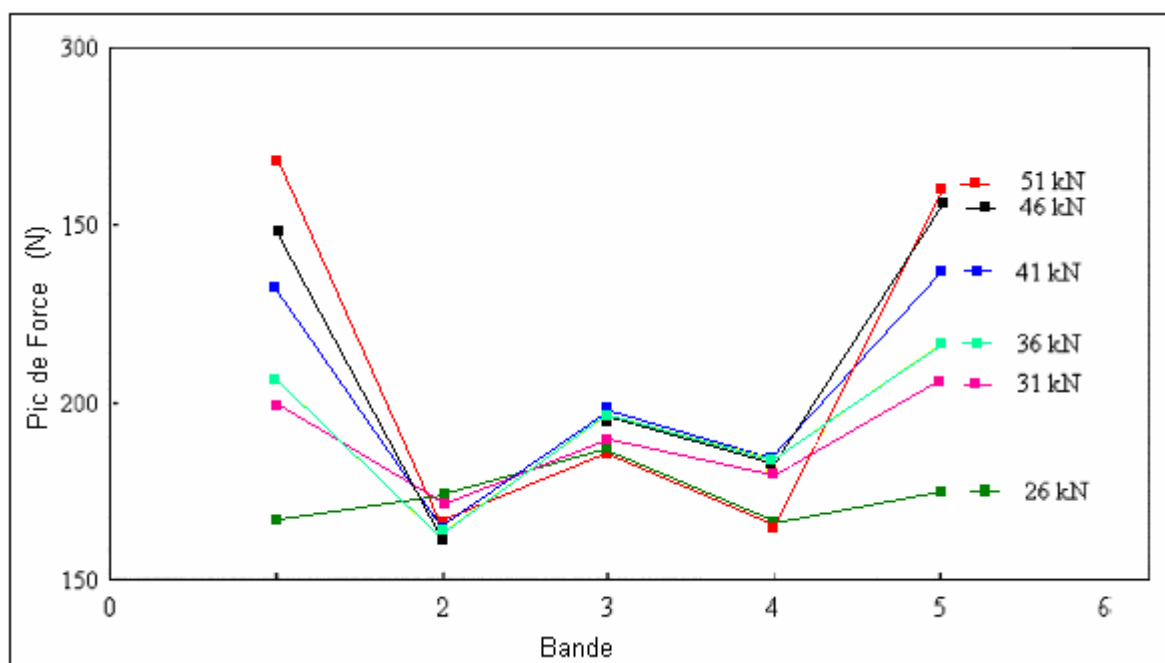


Figure 1.12.c : Différents niveaux de pression de contact sur les bandes de roulement de l'empreinte du pneu (De Beer, 1997)

Hua et al. (2002) ont analysé en détail l'influence de la forme de l'empreinte et les bandes de roulement sur la profondeur de l'orniérage. Ils ont proposée trois sections pour modéliser l'empreinte du pneu et la pression de contact :

- surface de contact avec des bandes de roulement et pression de contact non uniforme;
- surface de contact avec des bandes et pression de contact uniforme ;
- Surface de contact sans bande de roulement et pression de contact uniforme ;

Ils ont conclu que l'orniérage maximal avec une pression de contact uniforme est proche de celui avec une pression non uniforme. La figure 1.12d montre la profondeur d'ornière pour le pneu super single et le pneu jumeau avec différentes hypothèses sur l'empreinte du pneu. On note une influence modérée de la répartition de la pression de contact sur l'orniérage.

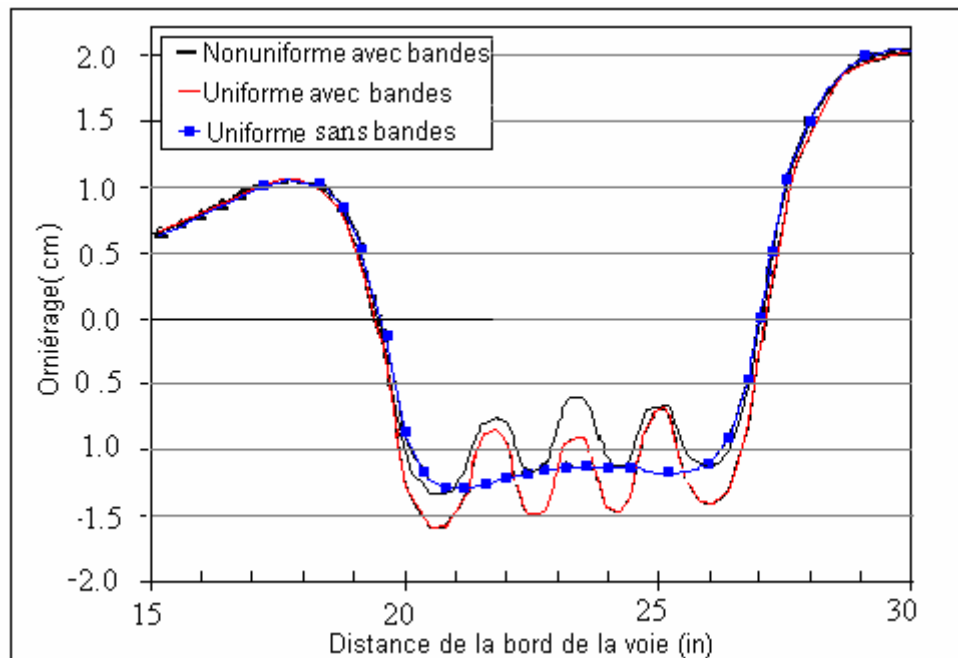


Figure 1.12.d : Orniérage avec différentes simplifications de l'empreinte du pneu super single (Hua, 2002)

Déplacement transversal

L'incorporation du déplacement transversal dans le modèle de chargement est très importante pour prédire l'orniérage (White et al. 2002, Archilla et al. 2001). Des observations sur des chaussées en service ont montré que la distribution transversale de la circulation sur les chaussées suit statistiquement une distribution normale logarithmique à trois paramètres (White et al. 2003, Wardle et al. 2003). Plusieurs facteurs affectent le déplacement transversal notamment la géométrie de la chaussée (nombre et largeur des voies), les conditions de trafic, les caractéristiques de la chaussée, les conditions du climat et le type de véhicule. White et al.

(2002) et Wardle et al. (2003) ont trouvé que le déplacement transversal varie avec le type de la chaussée (route, autoroute...). La largeur de la voie est le paramètre le plus significatif dans la détermination du déplacement transversal (Timm, 2005). La figure 1.13 montre l'influence de la largeur sur la distribution de la circulation sur la chaussée. Le degré d'extension du déplacement dépend aussi de la phase de formation de l'orniérage. Dans la phase de propagation, le déplacement transversal diminue car les véhicules ont la tendance à suivre la trace de l'orniérage (White et al. 2002).

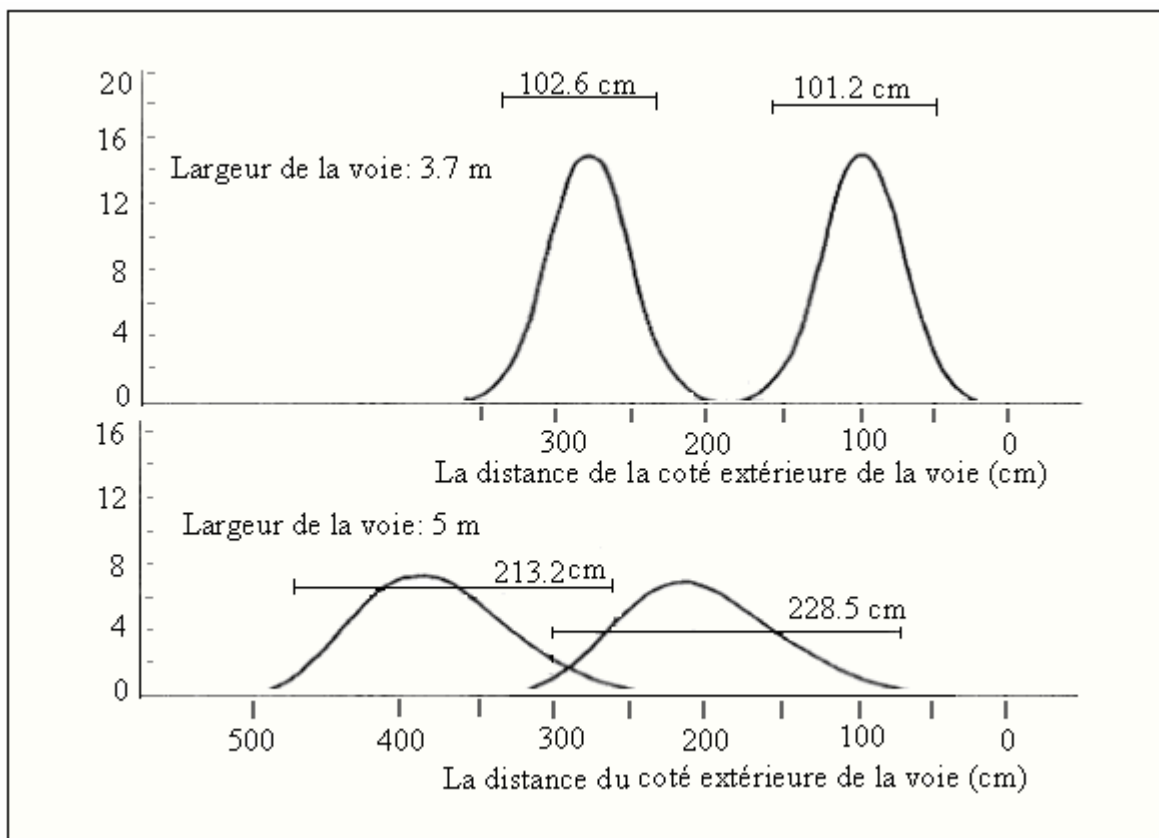


Figure 1.13 : Influence de la largeur de voie sur la distribution latérale de la circulation (White et al. 2002)

1.4 Conclusion

Ce chapitre a comporté une analyse bibliographique sur l'orniéage, qui constitue la principale dégradation des chaussées souples. Ce phénomène peut résulter des déformations viscoplastiques dans la couche de surface ou des déformations plastiques dans les autres couches. Plusieurs facteurs peuvent influencer le mécanisme de formation de l'orniéage, notamment la structure des chaussées (épaisseurs des ses couches, propriétés des matériaux..), les facteurs liés au trafic (type de pneus, charge par essieu, vitesse de circulation, pression de gonflage) et les facteurs environnementaux.

De nombreux modèles ont été élaborés pour étudier l'orniéage. La couche de surface est décrite par des modèles viscoélastiques ou viscoplastiques avec endommagement. Les couches inférieures sont généralement supposées élastiques. La charge du pneu est simplifiée par une surface de contact circulaire ou rectangulaire avec une pression de contact uniforme et égale à la pression de gonflage. Cependant, l'empreinte est plus près d'un rectangle que d'un cercle et la pression de contact n'est pas uniforme.

Ce travail a pour but d'étudier d'une manière approfondie la formation de l'orniéage et de proposer des recommandations pour réduire ce risque et pour la réparation des chaussées endommagées.

Dans le chapitre suivant, on présente les lois de comportement utilisées dans cette étude pour les différentes couches de la chaussée (couches d'enrobés bitumineux et couches inférieures). Ensuite, on présente une étude détaillée de la détermination des paramètres du modèle numérique proposé : Le chapitre suivant présente une validation de ce modèle et son application à l'analyse de l'influence de différents facteurs sur l'orniéage.

Chapitre 2

Analyse par éléments finis de l'orniérage

2.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente l'élaboration d'un modèle numérique destiné à mieux comprendre le mécanisme de formation de l'orniérage. Le comportement des couches de l'enrobé bitumineux est décrit en utilisant un modèle élasto-viscoplastique. Le modèle prend en compte l'influence de la température en utilisant le principe de superposition temps-température. Un modèle élasto-plastique est utilisé pour les couches inférieures. Le modèle reproduit d'une manière réaliste le chargement appliqué par la circulation. Le modèle proposé présente de nombreux avantages et permet d'apporter des améliorations par rapport aux modèles utilisés ultérieurement, notamment pour la modélisation du comportement du matériau, la prise en compte des facteurs environnementaux et la modélisation réaliste du chargement.

2.2 Lois de comportement

2.2.1 Couches d'assises

Le comportement des matériaux des couches d'assises de graves est décrit par un modèle élasto-plastique associé. La partie plastique utilise la surface d'écoulement de Mohr-Coulomb :

$$F = R_{mc}q - p \tan \phi - c \quad 2.1$$

Avec

$$R_{mc}(\Theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \phi} \sin(\Theta + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{3} \cos(\Theta + \frac{\pi}{3}) \tan \phi \quad 2.2$$

Où c est la cohésion des matériaux, ϕ l'angle de frottement, $q = \sqrt{3/2}(s:s)$ la contrainte équivalente de Von Mises, $s = \sigma - pI$ le déviateur de contrainte, $p = tr(\sigma)/3$ la contrainte moyenne, $r = (9/2 s:s : s)^{1/3}$ le troisième invariant des contraintes, Θ l'angle de Lode défini par $\cos(3\Theta) = (r/q)^3$.

La partie élastique est décrite par la loi de Hooke qui fait intervenir le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν .

2.2.2 Couche de surface

Pour décrire le comportement de la couche de surface de l'enrobé bitumineux, on utilise un modèle élasto-viscoplastique prenant en compte l'influence de la température.

Dans la couche de l'enrobé bitumineux, la déformation élastique dépend de la température T , de la contrainte σ et de la fréquence f_r :

$$\varepsilon^e = f_e(T, \sigma, f_r) \quad 2.3$$

Pour la partie permanente des déformations dans la couche de surface, on utilise un modèle élasto-plastique isotrope couplé à une loi de fluage en puissance. Il a été utilisé par plusieurs chercheurs pour évaluer l'orniérage (Olson et al. 2000, Hua et al. 2002, White et al. 2002).

Ce modèle utilise la surface d'écoulement de *Von Mises* $F = q - c$ et dépend de la loi d'écrouissage d'Uzan (1985) :

$$\varepsilon^{vp} = A' \sigma^n t^{m+1} \quad 2.4$$

Où n , m et A' sont des paramètres déterminés par des essais de fluage. L'annexe A2 présente le développement théorique de ce modèle et la méthode de détermination de ses paramètres.

Influence de la température

Pour prendre en compte l'influence de la température, on utilise le principe de superposition temps-température (Chehab 2002, Chehab et al. 2003). Selon ce principe, les réponses à un certain état de chargement et de température peuvent être déterminées à partir

d'essais sous d'autres conditions. Ceci permet de réduire le nombre d'essais nécessaires pour décrire le comportement de l'enrobé (Chehab, 2002) :

$$\varepsilon^{vp} = f_{vp}(t, T, \sigma) = f'_{vp}(\xi) g_{vp}(\sigma) \quad 2.5$$

Où $g_{vp}(\sigma)$ est un paramètre qui dépend de l'état de contrainte, ξ est le temps réduit défini par $\xi = t/(a_T)_{vp}$ et $(a_T)_{vp}$ est le facteur de changement de température pour des effets viscoplastiques.

Avec le principe de superposition temps-température, on peut réécrire l'équation 2.4 :

$$\varepsilon^{vp}(T) = A_r \sigma^n \xi^{m+1} \quad 2.6$$

Avec $A_r = A'(a_T)_{vp}^{m+1}$.

2.3 Modèle du chargement

Le modèle du chargement concerne le temps de passage et l'application de la charge du pneu sur la surface de la chaussée. Dans la partie suivante, on détermine ces deux paramètres. Une analyse sera présentée pour vérifier les différentes simplifications du temps de passage et de la représentation de la charge pour deux types de pneus (super single et jumeau).

2.3.1 Détermination du temps de passage du pneu

Le temps de passage du pneu dépend de la vitesse de déplacement et de la longueur de l'empreinte du pneu. Dans cette étude, on se base sur le modèle de chargement proposé par Fang (2001).

Temps du chargement pour un élément

La figure 2.1a présente le temps de chargement pour le premier élément :

$$T = t_1 + t_2 + t_3 = \frac{a}{v} + \frac{b-a}{v} + \frac{a}{v} = \frac{a+b}{v}$$

Où

$$T_1 \rightarrow T_2 \quad t_2 = T_1 - T_0 = \frac{a}{v}$$

$$T_1 \rightarrow T_2 \quad t_2 = T_2 - T_1 = \frac{b}{v} - \frac{a}{v} = \frac{b-a}{v}$$

$$T_2 \rightarrow T_3 \quad t_3 = T_3 - T_2 = \frac{a+b}{v} - \frac{b}{v} = \frac{a}{v}$$

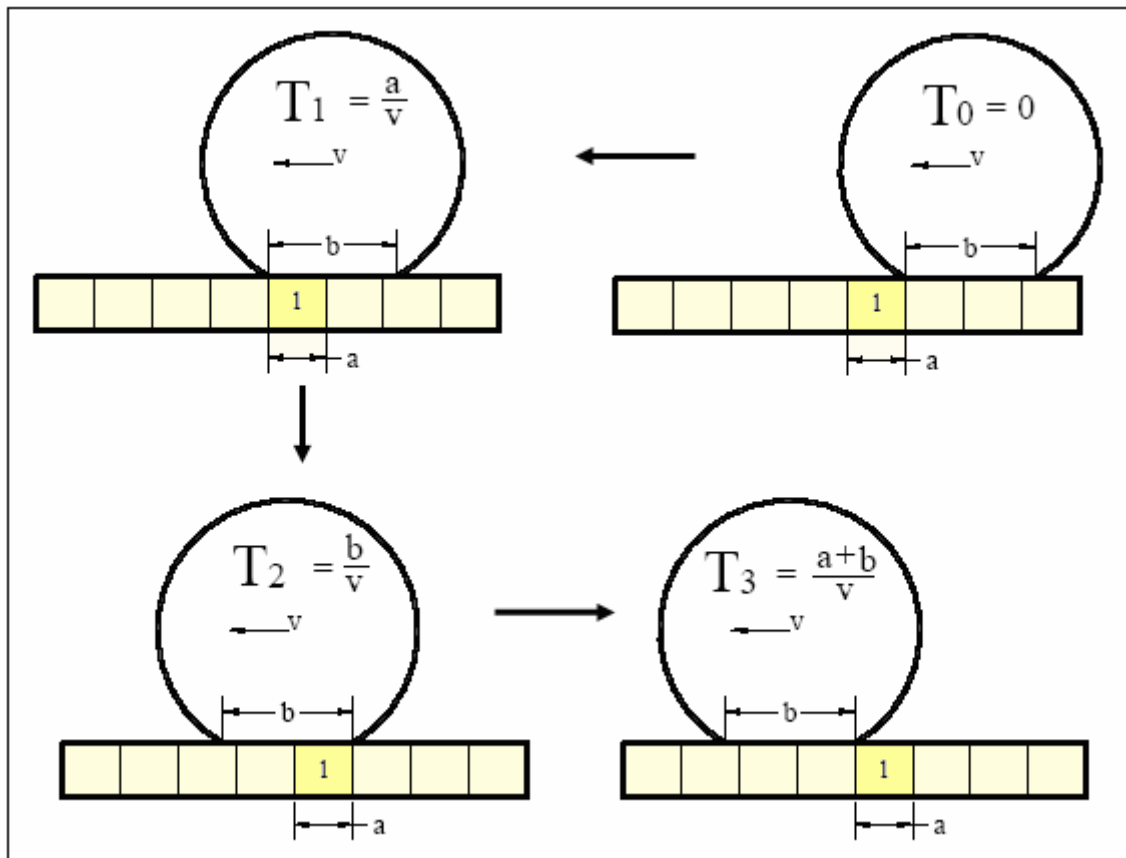


Figure 2.1a : Temps d'un incrément de chargement (Fang, 2001)

Dans le temps $T_0 \rightarrow T_1$ et $T_2 \rightarrow T_3$, le chargement total sur le premier élément n'est pas complètement appliqué, il change de zéro au maximum et du maximum à zéro respectivement. Mais il reste au maximum de T_2 à T_3 .

Les surfaces sous la courbe charge-temps pour les deux intervalles de temps ($T_0 \rightarrow T_1$, $T_2 \rightarrow T_3$) sont deux triangles avec la même surface. La figure 2.1b donne le détail de la transformation du temps.

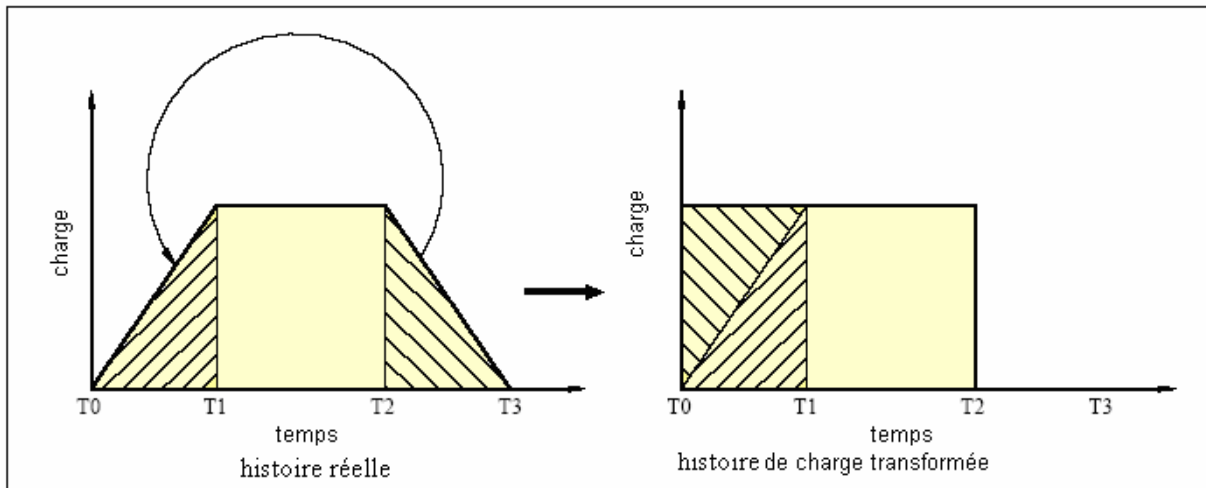


Figure 2.1.b : Transformation du temps de chargement

La durée du temps de $T_0 \rightarrow T_1$ ou de $T_2 \rightarrow T_3$ est beaucoup plus courte en comparaison à la durée réelle de temps de $T_1 \rightarrow T_2$, avec l'utilisation d'un maillage fin en dessous de la charge où la longueur d'éléments est beaucoup plus petite par rapport à la longueur de l'empreinte du pneu ($a \ll b$) et T égale à b/v . Le temps d'un cycle de passage du pneu se complète quand l'incrément de chargement est appliqué sur le dernier élément en dessous de l'empreinte.

Simplification du temps d'un passage du pneu

Un modèle alternatif de chargement a été utilisé pour réduire le temps de calcul d'un passage du pneu tout en conservant une bonne précision. Le modèle alternatif de chargement se base sur un seul incrément de chargement pour le chemin entier du pneu. Cette approche a été utilisée la première fois par Huang (1993) et plus tard par Pan (1997) (Fang, 2001).

La figure 2.1c présente le principe de cette méthode qui permet d'employer le temps cumulatif total dans un seul incrément.

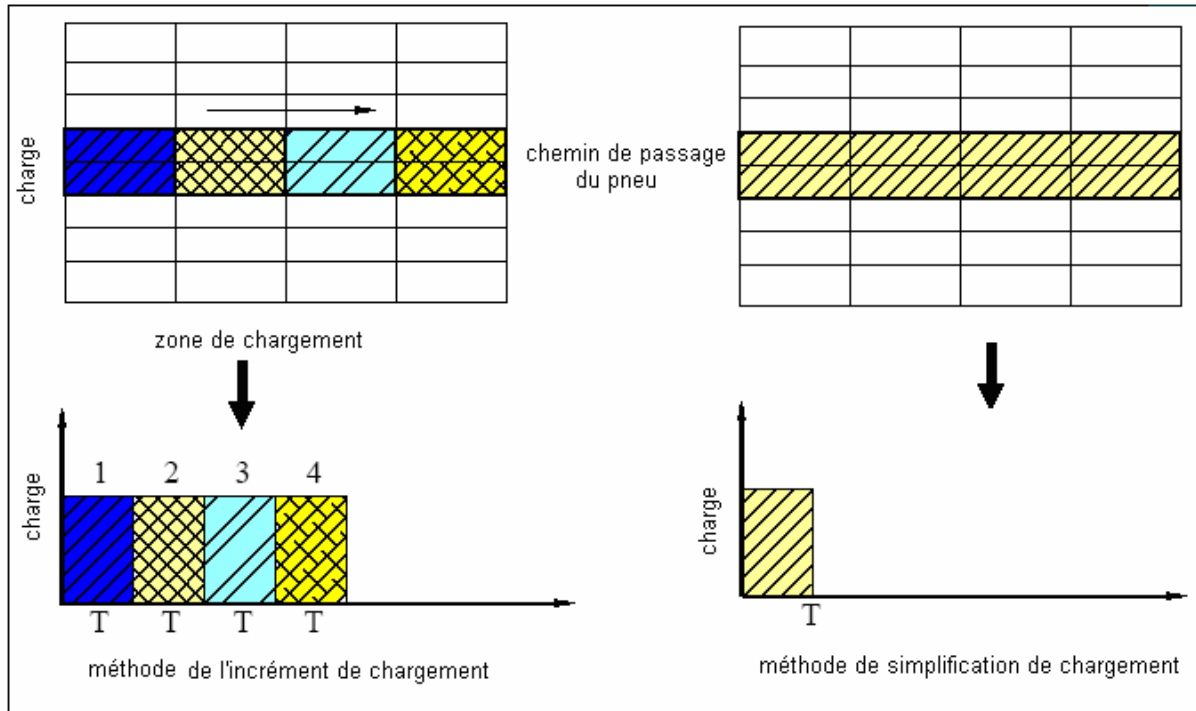


Figure 2.1c : Simplification du mode de chargement (Fang, 2001).

Simplification du temps de N passages

L'analyse doit prendre en compte les cycles de chargement liés au nombre de passages. Cependant, cette méthode a besoin d'un temps de calcul important. Dans la méthode utilisée, pour un nombre de passage N , l'analyse est réalisée avec un seul incrément de chargement pour un temps $N \cdot T$. Ceci réduit fortement le temps du calcul.

2.3.2 Modélisation de la charge du pneu

On peut classer les pneus utilisés en deux principaux groupes, à savoir les pneus jumeaux et les pneus super single. Dans cette étude, on utilise deux pneus :

- Pneu super single Michelin 385/65R22.5
- Pneu jumeau Michelin 295/80R22

Les figures 2.2a et 2.2b montrent ces pneus.



Figure 2.2a : Pneu jumeau (Michelin 295/80R22).



Figure 2.2b : Pneu super single (Michelin 385/65R22.5).

La figure 2.3 montre les différentes simplifications pour décrire la charge du pneu sur la chaussée :

- empreinte du pneu avec les bandes de roulement avec différents niveaux de pression de contact (P_1, P_2, \dots) (figure 2.3. A).
- empreinte avec des bandes de roulement et une pression moyenne de contact sur la surface chargée (figure 2.3. C).
- surface totale des bandes de roulement et de l'espace vide, avec une pression uniforme de contact égale à la pression moyenne sur la surface totale : $\bar{p}_e = \text{charge par essieu} / (\text{largeur totale de vides et des bandes de roulement} \times \text{longueur})$ (figure 2.3.B).
- surface rectangulaire déterminée par l'équation ($A_s = 0,5227 L^2$) avec une pression de contact égale à la pression de gonflage \bar{p}_s (figure 2.3.D)

La modélisation par éléments finis de l'empreinte avec des bandes de roulement de différents niveaux (le plus proche de l'empreinte réelle) est complexe notamment avec le déplacement

transversal. C'est pourquoi, il est nécessaire de procéder à des simplifications afin d'analyser aisément l'influence des différents facteurs sur l'orniérage.

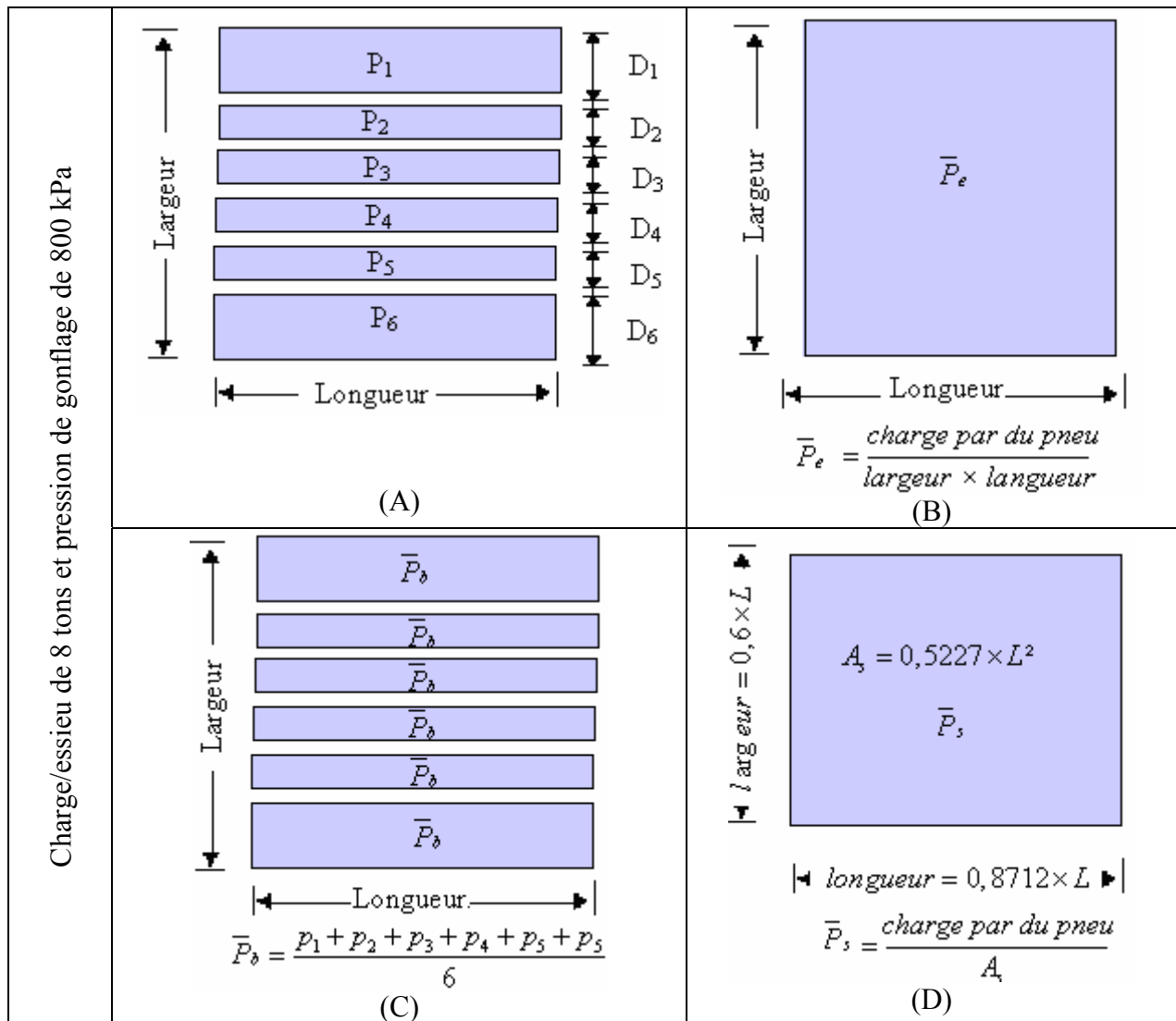


Figure 2.3 : Simplifications de la charge du pneu sur la surface de la chaussée.

2.3.3 Analyse de l'influence du mode de chargement

Dans cette partie, une analyse par éléments finis est réalisée pour vérifier l'influence des différentes simplifications du mode de chargement sur la réponse de la chaussée.

La structure utilisée dans l'analyse se compose de trois couches : une couche d'enrobé bitumineux de 15 cm, une couche d'assises de 40 cm et une couche de fondation de 20 cm en

béton supposée très rigide. La figure 2.4 donne le maillage retenu dans l'analyse. Les tableaux 2.1a et 2.1b donnent les paramètres matériaux utilisés dont la détermination sera présentée en détail au chapitre 3.

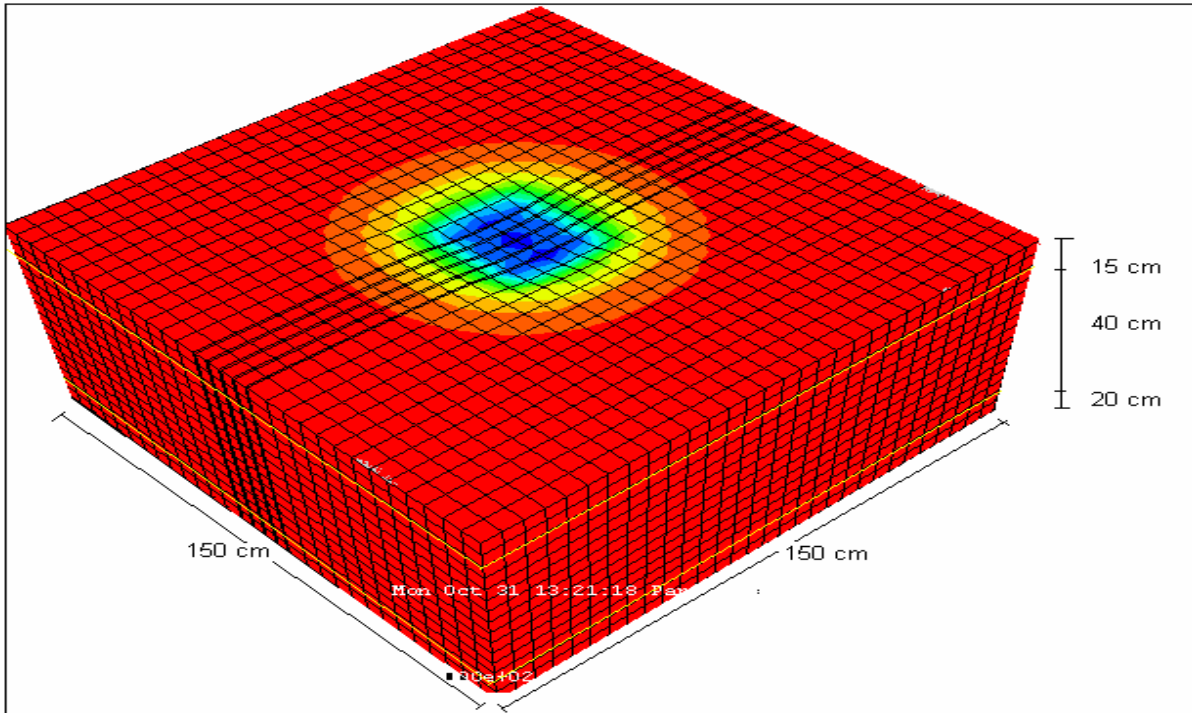


Figure 2.4 : Maillage utilisé pour étudier la modélisation de la charge du pneu.

Tableau 2.1a : Propriétés de la couche de surface

| | Couche de surface en enrobé bitumineux |
|---------|--|
| E (MPa) | 2300 |
| A | $1,2^E-6$ |
| n | 0,88 |
| m | -0,51 |

Tableau 2.1b : Propriétés de la couche de base et de fondation

| | Couche d'assise | Coche de fondation |
|--|-----------------|--------------------|
| E (MPa) | 400 | 20000 |
| l'angle de frottement, ϕ ($^\circ$) | 30 | - |
| Cohésion, c (kPa) | 10 | - |
| ν | 0,35 | 0,15 |

Simplification du temps de passage

Une analyse a été réalisée pour identifier l'effet de la simplification du temps de passage du pneu sur la profondeur de l'orniérage. Dans un cas, l'incrément du chargement avec le temps T a été appliqué pas à pas dans la direction longitudinale pour simuler le passage du pneu. Dans l'autre cas, l'incrément du chargement a été appliqué sur un chemin entier du pneu avec de temps T . Les résultats des deux calculs sont montrés dans la figure 2.5. On constate que la forme du profil de la chaussée déformée est identique dans les deux cas. La différence sur la profondeur maximale d'ornière est d'environ 3% (des constatations similaires ont été trouvées par Fang, 2001).

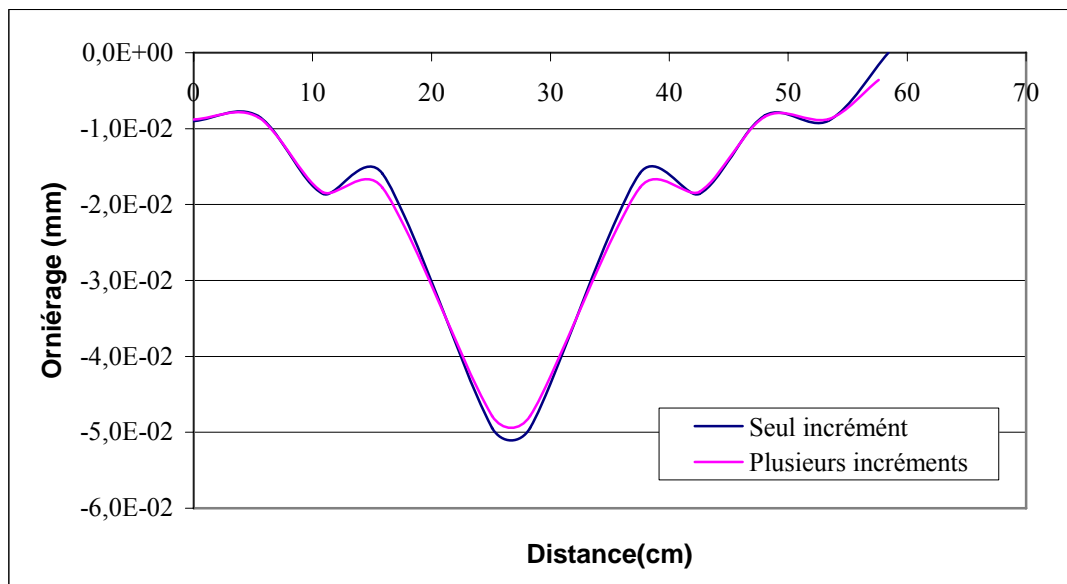


Figure 2.5 : Influence de la discrétisation dans le temps sur la réponse de la chaussée (pneu super single, pression de gonflage = 700 et charge/essieu = 11,5 tonnes)

Simplification du temps de N passages

Pour étudier l'effet de la simplification du nombre N de passages du pneu, une analyse réalisée avec N incréments ($\Delta t = T$) a été comparée à une analyse avec un incrément de chargement ($\Delta t = N \cdot T$). La figure 2.6 donne la profondeur de l'orniérage pour les deux cas. On constate que les deux formes de l'orniérage sont identiques et que la différence sur la profondeur maximale d'ornière est d'environ 2%.

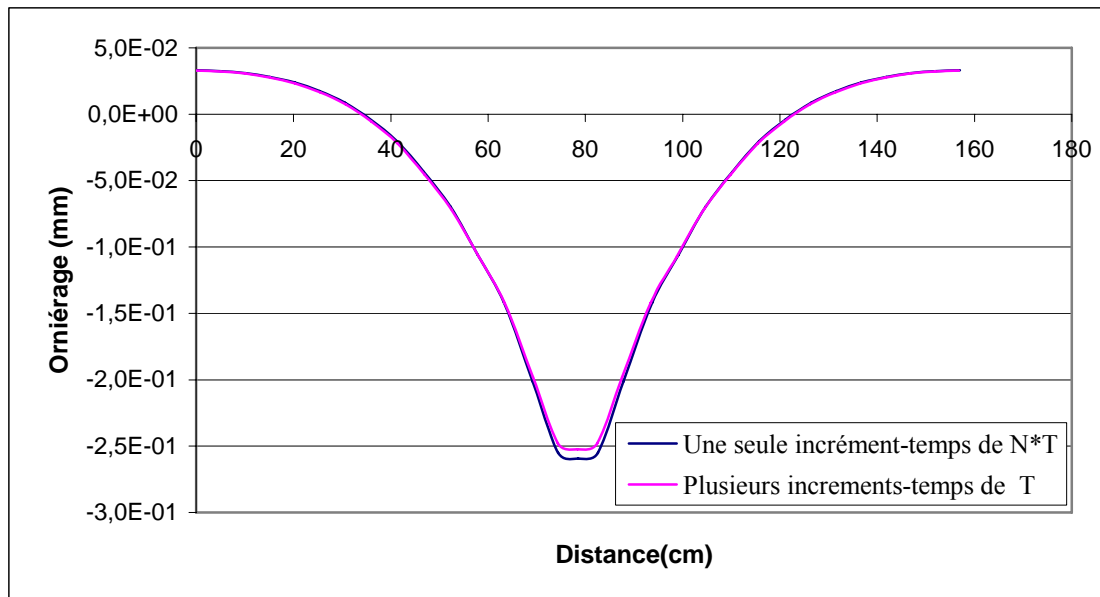


Figure 2.6 : Influence de la modélisation du temps de chargement (pneu super single, pression de gonflage = 700 et charge/essieu = 11,5 tonnes)

Simplification de la charge du pneu (valeur et surface de contact avec la chaussée)

Pneu super single (Michelin 385/65R22.5)

L'analyse pour la modélisation du chargement produit par le pneu super single est fondée sur les mesures de l'empreinte de pneu réalisées au LAVOC. Dans l'analyse, on applique des charges/essieu de 11,5 tonnes (pression de gonflage = 800kPa) et de 8 tonnes (pression de gonflage = 600 kPa). Les résultats obtenus par De Beer (1997) ont été utilisés pour déterminer les différents niveaux de pression de contact des bandes de pneu (P_1 , P_2 ...) (Figure 1.12c). Les figures 2.7a et 2.7b montrent les différentes simplifications de l'empreinte pour les deux cas de charge. Notre analyse est concentrée sur trois points : le déplacement vertical et la déformation de cisaillement.

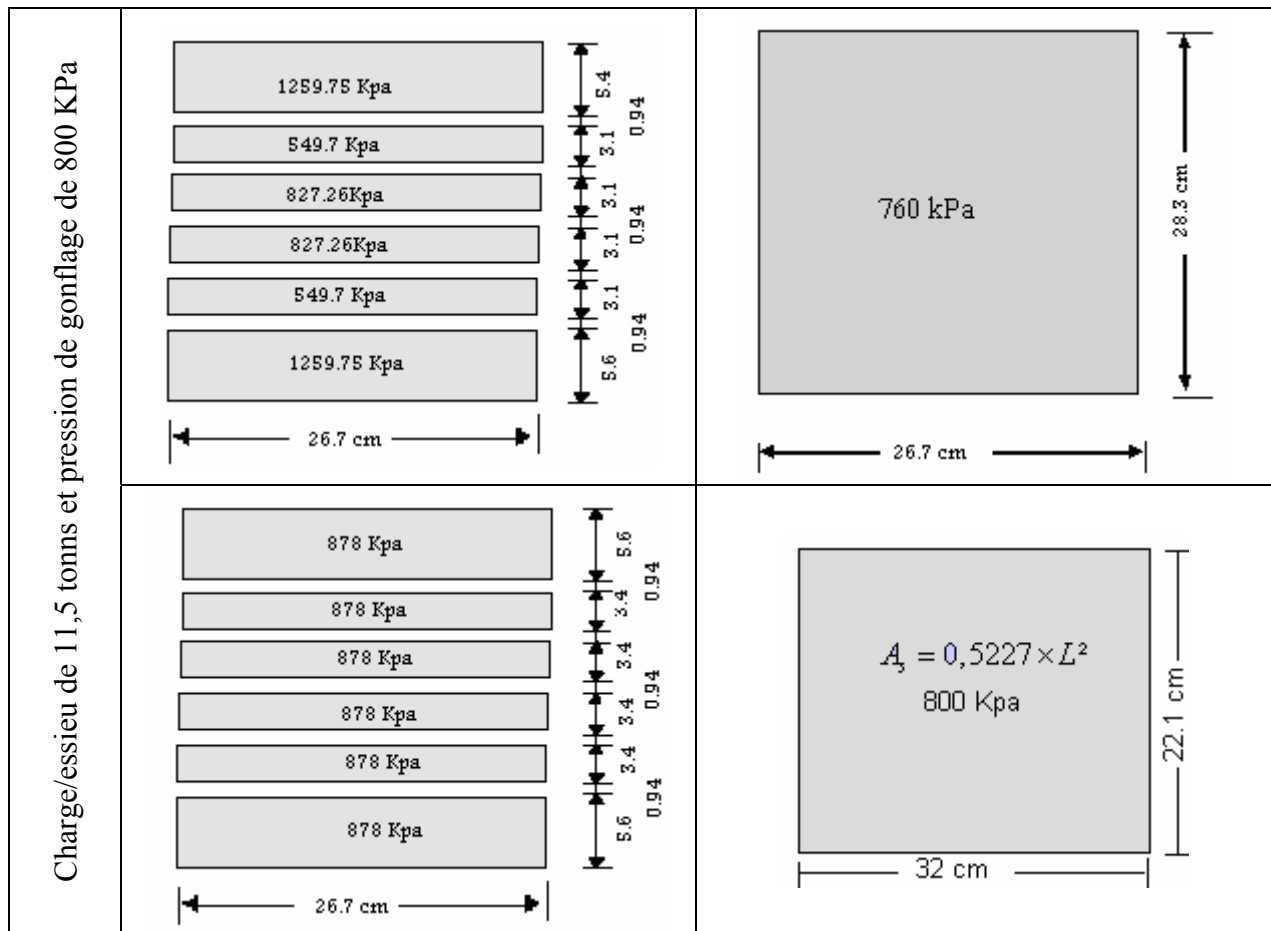


Figure 2.7a : Modélisation du chargement du pneu super single (charge/essieu = 11,5 tonnes, pression de gonflage = 800 kPa).

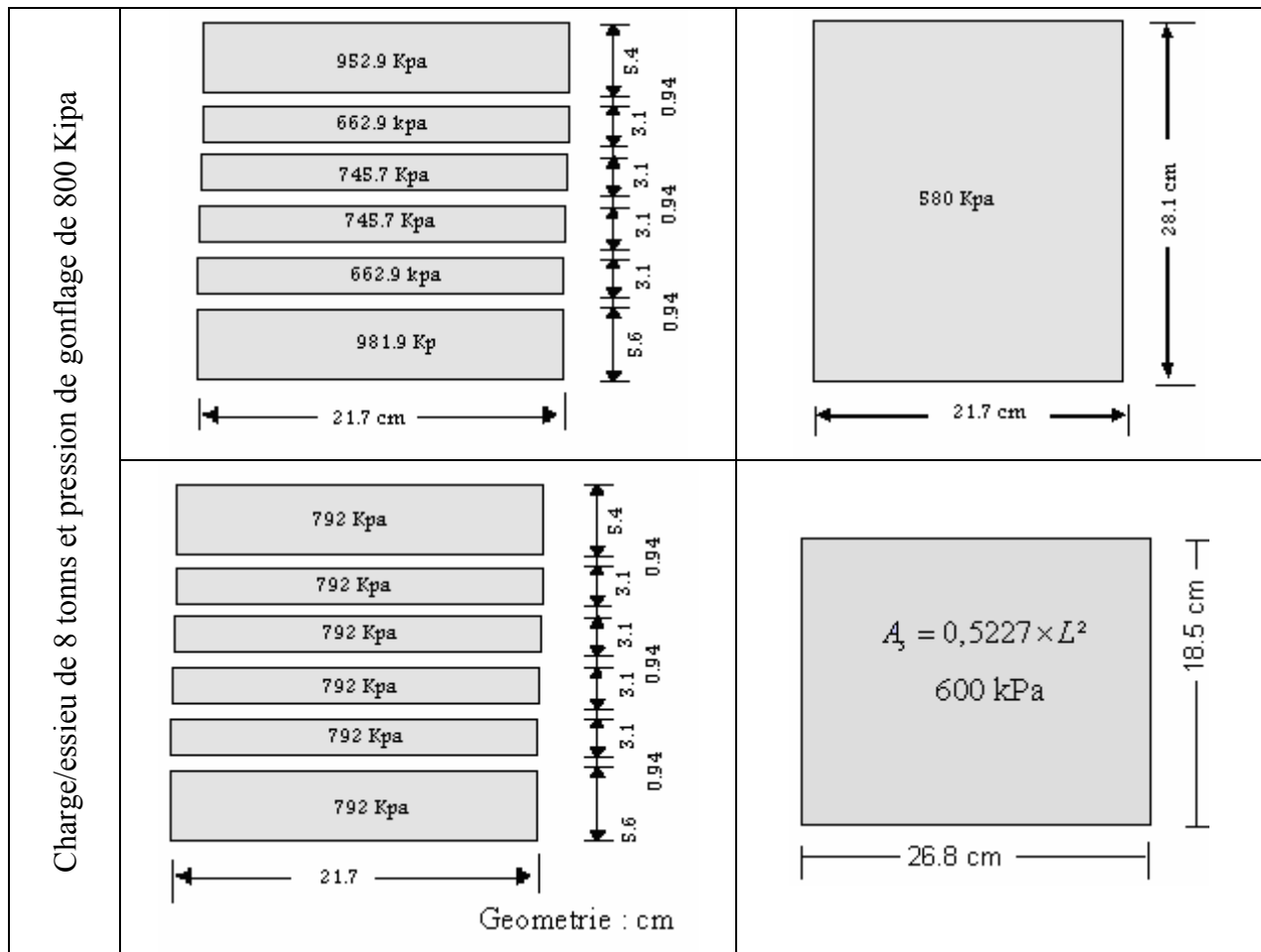


Figure 2.7b : Modélisation du chargement du pneu super single (charge/essieu = 8 tonnes, pression de gonflage = 600 kPa)

Déplacement vertical

Les figures 2.8a et 2.8b illustrent le déplacement vertical obtenu avec les différentes simplifications. On peut noter que :

- Les différentes méthodes donnent des valeurs très proches pour la profondeur maximale.
- Les résultats obtenus avec la surface totale et une pression uniforme de contact sont très proches de ceux obtenus avec l'empreinte ayant des bandes et pressions différentes.
- La simplification basée sur l'équation proposée par Huang (1993) ($A_s = 0,5227L^2$) s'écarte des autres méthodes, en particulier pour la charge/essieu de 8 tonnes.

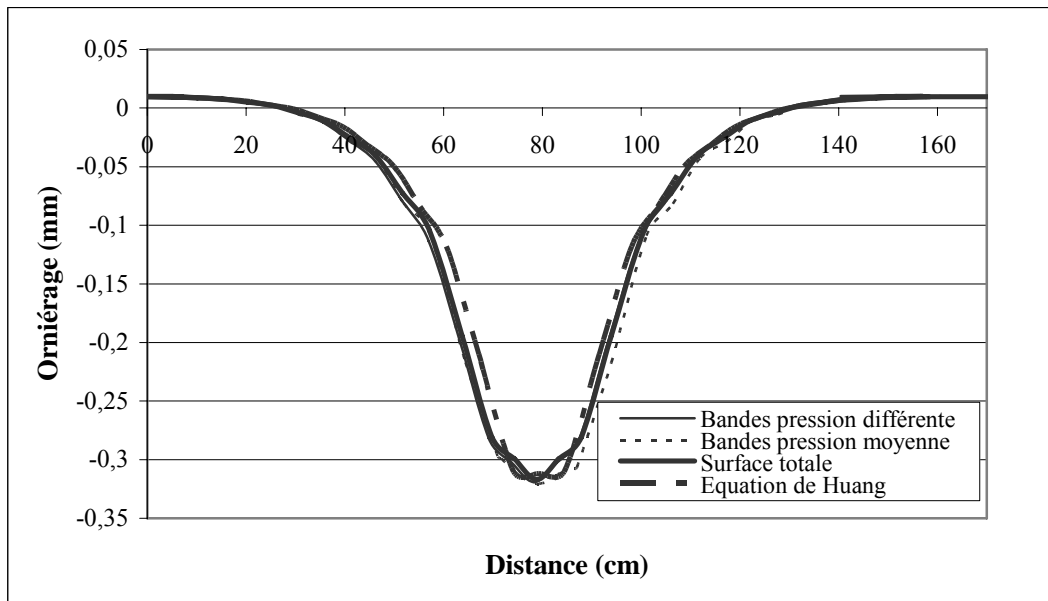


Figure 2.8a : Influence de la modélisation du chargement sur le déplacement vertical (charge/essieu = 11,5 tonnes, pression = 800 kPa.)

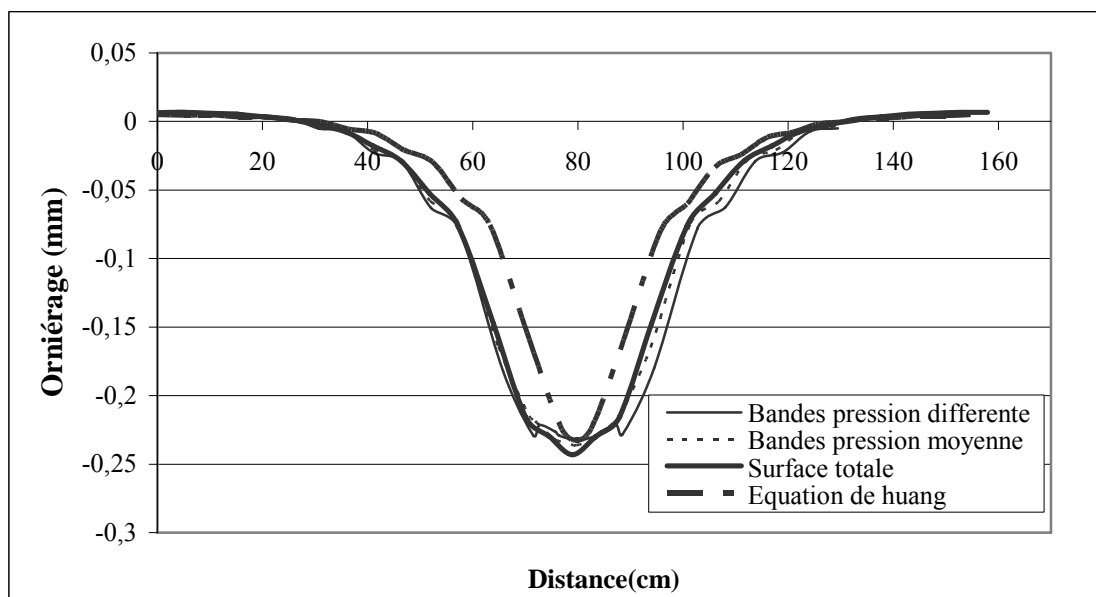


Figure 2.8b : Influence de la modélisation du chargement sur le déplacement vertical (charge/essieu = 8 tonnes, pression = 600 kPa.)

Déformation de cisaillement

La figure 2.9 donne les déformations de cisaillement obtenues avec l'hypothèse de la simplification de la surface totale (vides et bandes de roulement) et avec l'empreinte des bandes de roulement et des différentes pressions de contact. On constate un très bon accord entre les deux résultats sur la déformation de cisaillement, qui influence d'une manière importante l'orniérage.

Enfin, on peut conclure à partir de l'analyse précédente que la modélisation de la charge avec la surface totale reproduit d'une manière satisfaisante la charge du pneu super single.

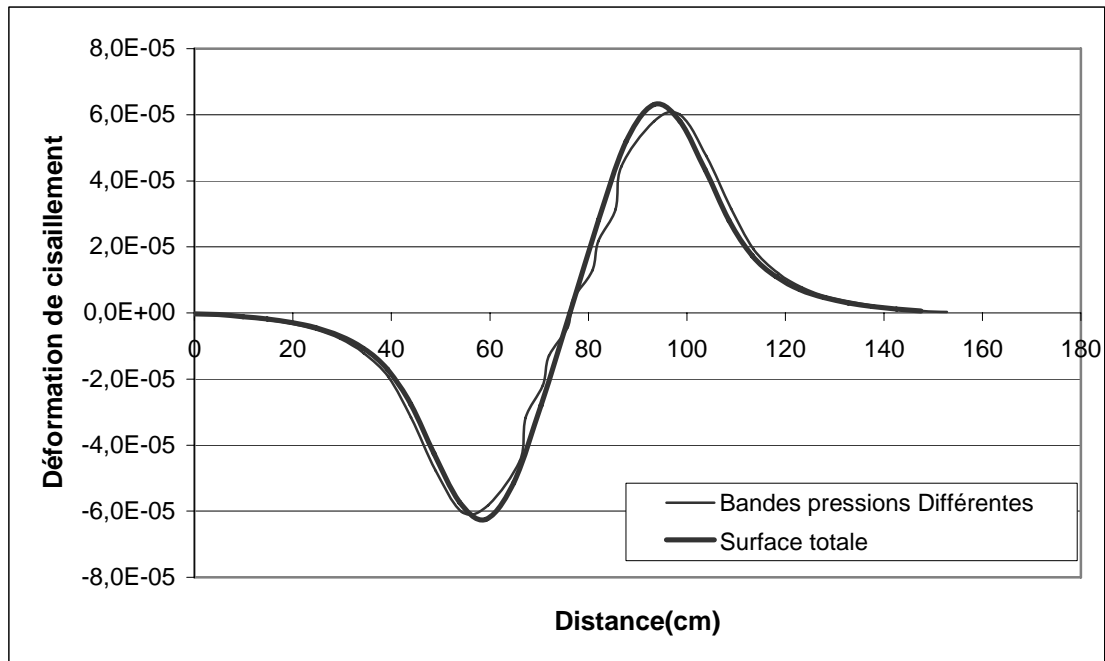


Figure 2.9 : Influence du mode de chargement sur le cisaillement (charge/essieu = 8 tonnes, pression de gonflage = 800 kPa, pneu super single)

Pneu jumeau (Michelin 295/80R22.)

En l'absence des mesures avec le pneu Michelin 295/80R22.5, on utilise les données du pneu jumeau Goodyear 11R22.5. Il a des caractéristiques très proches du pneu Michelin 295/80R22 (tableau 3.2). Une approximation similaire a aussi été adoptée par Hua et al. (2002). La figure 2.10a donne l'empreinte du pneu (White et al. 2002) et les différentes modélisations de l'empreinte avec une charge/essieu de 26 kN et une pression de gonflage de 720 kPa.

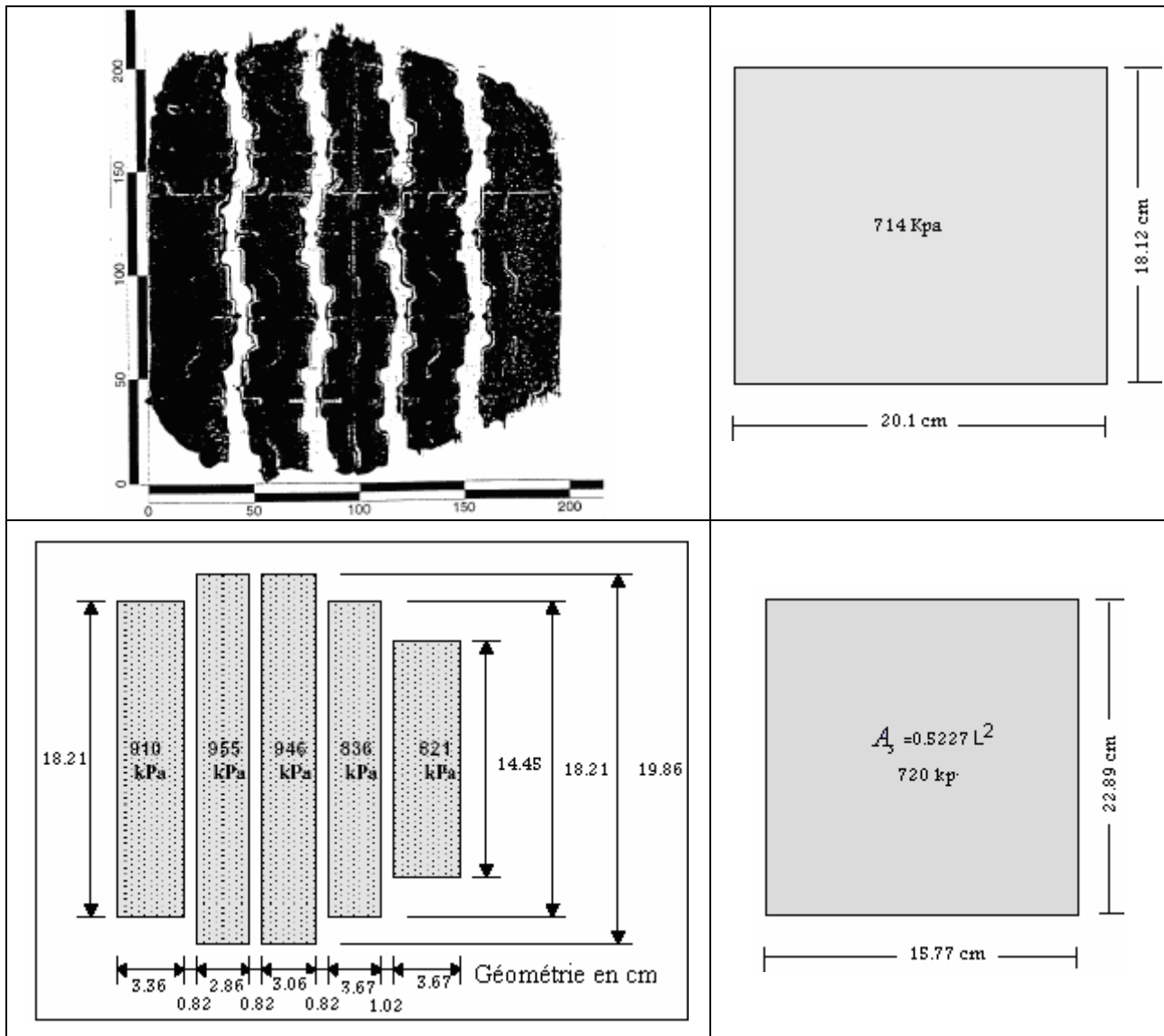


Figure 2.10a : Différentes modélisations pour l'empreinte d'un pneu jumeau (charge/ pneu 26 kN et une pression de gonflage de 720 kPa pneu de Goodyear 11R22.5). Géométrie en cm

Tableau 2.2 : Configuration de deux types de pneus jumeaux ; Michelin et Goodyear (Cost-334, 2002).

| Type de pneu | Dimensions du pneu (mm) | | Capacité d'essieu (kg) | | Pression de gonflage (kPa) |
|----------------------|-------------------------|----------|------------------------|--------|----------------------------|
| | Géométrie | | single | Jumeau | |
| | Largeur de la section | Diamètre | | | |
| Michelin 295/80R22.5 | 298 | 1044 | 7100 | 12600 | 850 |
| Goodyear 11R22.5 | 279 | 1050 | 6300 | 11600 | 850 |

Les résultats des analyses sont montrés dans la figure 2.1.b. On note un faible écart entre les différentes modélisations. Cependant, la simplification de la surface totale est plus proche de l'empreinte réelle.

A partir du résultat de cette analyse et en l'absence de mesures, pour l'estimation de l'orniérage maximal, on peut utiliser la simplification de Huang ($A_s = 0,5227L^2$).

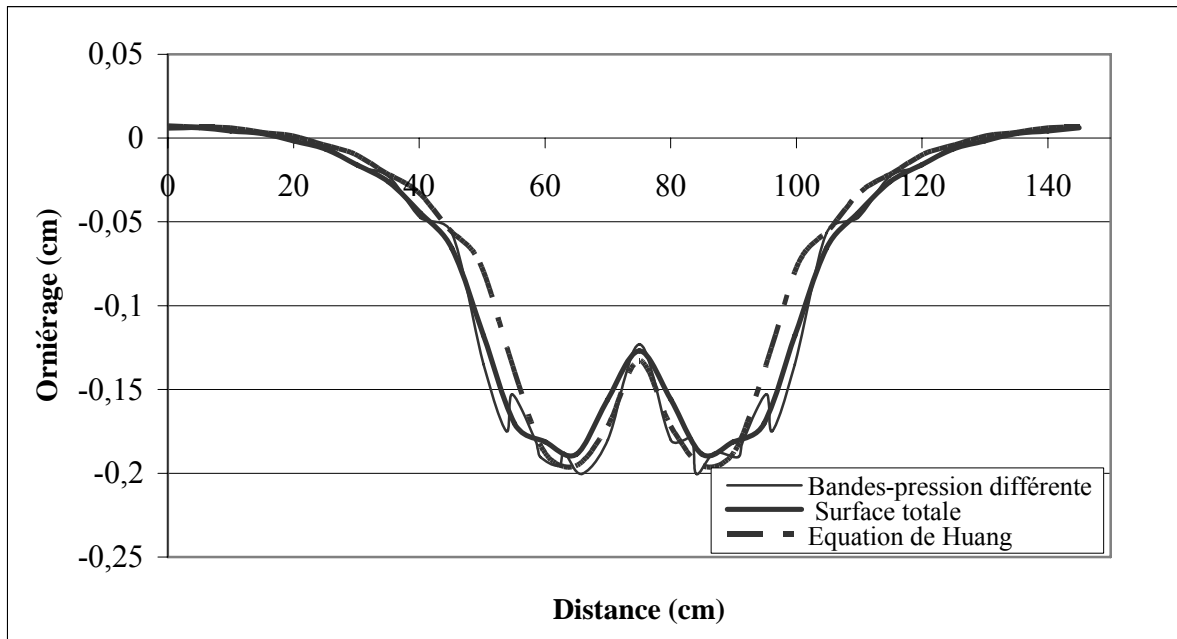


Figure 2.10b : Profondeur de l'orniérage avec différentes modélisations de l'empreinte, pneu jumeau (Goodyear 11 R22.5)

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un modèle numérique pour décrire l'orniérage dans les chaussées souples. Dans ce modèle, les couches inférieures sont décrites par un modèle élastoplastique avec une surface d'écoulement de Mohr-Coloumb. Un modèle elasto-viscoplastique est utilisé pour décrire le comportement des couches de surface. L'influence de la température est prise en compte en utilisant le principe de superposition temps-température.

Différentes modélisations sont proposées pour le mode de chargement (distribution de la pression, durée...). Les analyses effectuées montrent que la simplification de la charge avec la surface totale (bandes de roulement et vide) et la pression moyenne donne des résultats satisfaisants pour le pneu super single. On peut utiliser la surface de contact proposée par Huang ($A_s = 0,5227L^2$) pour les pneus jumeaux. Les résultats montrent également que l'analyse réalisée avec un seul incrément de chargement donne des résultats satisfaisants pour l'estimation de l'orniérage.

Le chapitre qui suit concerne la détermination des paramètres du modèle et sa validation avec les mesures réalisées au LAVOC.

Chapitre 3

Validation numérique sur des essais en vraie grandeur

3.1 Introduction

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les modèles de comportement pour les différentes couches des chaussées et les techniques utilisées pour modéliser le comportement de la chaussée à l'orniérage. Ce chapitre présente une validation des modèles sur des essais en vraie grandeur effectués au Laboratoire de Voie et Circulation à Lausanne (LAVOC). La validation sera précédée par une description des essais et une détermination des paramètres des modèles. La validation est effectuée sur les mesures instantanées et à long terme.

3.2 Description des essais (Perret et al. 2001, 2003).

Des essais en vraie grandeur ont été effectués au LAVOC pour étudier la réponse de la chaussée et son comportement à l'orniérage pour différentes configurations d'essais et de conditions de chargement.

3.2.1 Présentation de la section d'étude

Les essais ont été réalisés sur une chaussée composée des couches suivantes (figure 3.1) :

- Couche de roulement en enrobé bitumineux (MR11) de 3 cm d'épaisseur; L'analyse granulométrique du MR11 (macro rugueux 11 selon SN_640435) est présentée dans le tableau 3.1a
- Couche de base en enrobé bitumineux (HTM22s) de 14 cm d'épaisseur. Le tableau 3.1a présente l'analyse granulométrique de ce matériau (enrobé à chaud pour couche de base selon SN_640431). Le tableau 3.1b présente les paramètres de conception de Marshal de ces enrobés bitumineux (MR11, HMT22s) ;
- Couche de base de graves (0/60 mm) composée de deux couches de 20 cm d'épaisseur. Le tableau 3.1a présente l'analyse granulométrique de base des graves;
- Couche de sol de support de sable fin (0/2 mm, lavé) de 122 cm d'épaisseur, le tableau 3.1c donne l'analyse granulométrique ;
- couche de fond de dalle fosse en béton de 20 cm d'épaisseur.

Il faut noter que, le dimensionnement a été effectué de sorte que les déformations verticales au sommet de la couche de sol de support restent limitées, pour éviter l'orniérage structurel dû à la dégradation des couches inférieures.

Tableau 3.1a : Analyse granulométrique des matériaux utilisés dans la section d'essais (Perret et al. 2001, 2003).

| Tamis d'analyse (mm) | Type de la couche | | |
|-------------------------|--------------------------|------|--------|
| | HMT22s | MR11 | assise |
| | Passant cumulée% (masse) | | |
| 63 | | | 100 |
| 45 | | | 95,3 |
| 31,5 | 100 | | 69,4 |
| 22,4 | 96,5 | | 54,9 |
| 16 | 83,3 | 100 | 42,8 |
| 11,2 | 66,4 | 99 | 35,4 |
| 8 | 54 | 64,9 | 29,6 |
| 5,6 | 43,7 | 32,2 | 24,5 |
| 4 | 36,1 | 30,5 | 21,2 |
| 2,8 | 29,8 | 28,4 | 18,6 |
| 2 | 25,3 | 23,4 | 16,4 |
| 1,4 | - | - | 12,3 |
| 1 | 18,3 | 16,7 | 10,2 |
| 0,5 | 13,8 | 13,8 | 8,4 |
| 0,25 | 10,4 | 11,9 | 4,4 |
| 0,125 | 8 | 10,1 | 1,4 |
| 0,09 | 6,9 | 9,1 | 0,7 |

Tableau 3.1b : Caractéristiques d'enrobés bitumineux utilisés dans la section d'essais (Perret et al. 2001, 2003).

| Essai de Marshall | HMT22s | MR11 |
|--|--------|-------|
| Masse volumique apparente (g/cm ³) | 2,387 | 2,319 |
| Teneur en vides HM (%) | 6,6 | 6,6 |
| Teneur en vides comblés HR (%) | 60,9 | 66,4 |
| Stabilité SM (kN) | 9,8 | 6,0 |
| Fluage FM (mm) | 2,3 | 31 |
| SM/FM (KN/mm) | 4,2 | 2 |
| Teneur en liant sur granulats (%) | 4,31 | 4,10 |

Tableau 3.1c : Détails sur l'analyse granulométrique de la couche sol de support (Perret et al. 2001, 2003).

| | |
|---|------|
| La taille maximale de tamis [mm] : | 2,0 |
| Passant au diamètre 0,02mm (%) : | 2,7 |
| Passant entre le diamètre 0,02mm et 0,5mm (%) : | 93,3 |
| Passant entre le diamètre 0,5mm and 2,0mm (%) : | 4,0 |

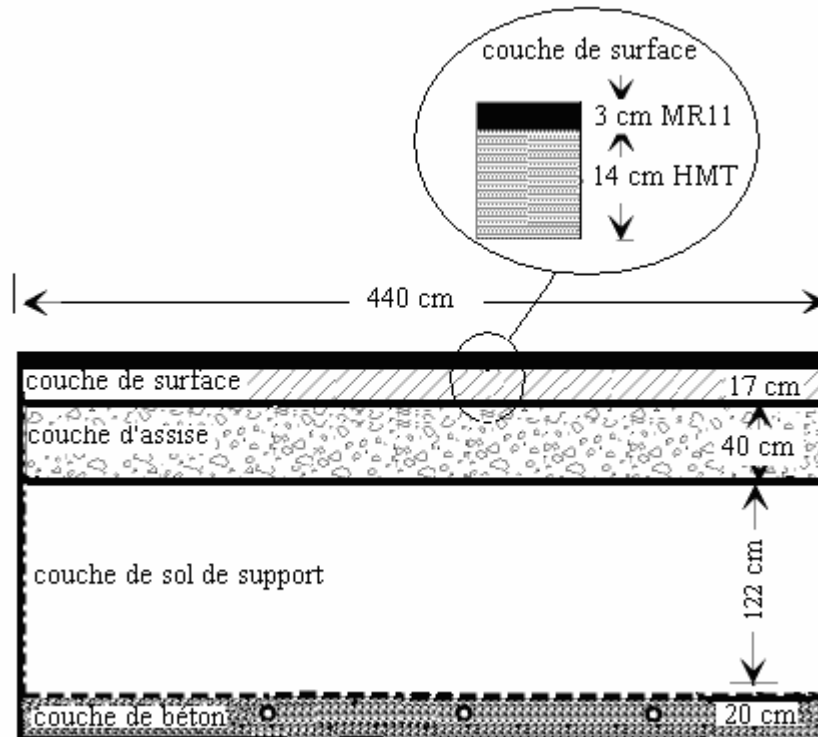


Figure 3.1 : Chaussée utilisée dans les essais en vraie grandeur

3.2.2 Chargement

Le chargement est appliqué par un simulateur de trafic constitué d'un essieu qui peut reproduire les différentes intensités de charge et pression de gonflage. Les essais ont été réalisés dans les conditions suivantes :

- pneus jumeau et super single ;
- fréquence jusqu'à 2000 passages/heure ;
- charge de 11,5 tonnes/essieu ;
- vitesse de déplacement maximale de 12 km/h ;
- longueur totale de roulement de 4 m ;
- pression de gonflage entre 600 et 800 kPa.

La chaussée a été testée pour différentes températures des couches de l'enrobé bitumineux : 5,15 et 30°C pour la première étape des essais (mesures instantanées) et à 50°C pour la deuxième étape (mesures à long terme).

3.2.3 Mesures effectuées

Le programme d'essais a comporté deux étapes:

-La première étape concerne la réponse instantanée. Elle a comporté la mesure de la déformation longitudinale en bas des couches de l'enrobé bitumineux et du déplacement (déflexion) vertical à la surface des couches de l'enrobé bitumineux. Les mesures sont effectuées pour différentes conditions de trafic (intensité de la charge, pression des pneus, type de pneu, température).

-La deuxième étape a comporté des essais à haute température (50°C) jusqu'à la dégradation totale de la chaussée par formation d'ornièrè. Il s'agit des essais à long terme. Les essais ont été effectués selon deux modes de répartition des charges de trafic, sans ou avec déplacement latéral. Deux essais ont été réalisés sur des chaussées ayant la même structure : essais HMT22-4 et HMT22-5. Le premier essai a comporté plus de cycles de passages.

3.3 Détermination des paramètres des modèles

3.3.1 Couche de surface

Partie élastique (E, ν)

Le module d'élasticité retenu pour les matériaux bitumineux dépend de la température et de la fréquence de chargement. La fréquence (f) est liée à la vitesse de circulation(ν) selon la relation :

$$f(Hz) = 0,45V(km/h) \quad 3.1$$

Les résultats des essais réalisés au LAVOC à différentes températures et fréquences ont permis de déterminer le module d'élasticité E.

Les tableaux 3.2a et 3.2b donnent le module d'élasticité pour les deux types d'enrobé bitumineux en fonction de la température et de la fréquence.

L'influence de la température sur le module d'élasticité est prise en compte à l'aide du modèle d'Ullidtz (1998) :

$$E_T = E_{ref} \exp(a_E [T - T_{ref}]) \quad 3.2$$

E_T : Module d'élasticité à la température T (°C)

E_{ref} : Module d'élasticité à la température de référence ($T_{ref} = 25^\circ\text{C}$)

a_E : Facteur de changement de température pour l'effet élastique. Ce facteur a été déterminé en utilisant des mesures expérimentales. Les figures 3.2a et 3.2b présentent la variation de ce facteur avec la température pour les couches de l'enrobé bitumineux (MR11 et HMT22s). Cette variation peut être approximée par un polynôme de second degré comme le montre les figures 3.2a et 3.2b.

Le coefficient de Poisson est supposé constant : $\nu = 0,35$.

Tableau 3.2a : Valeur du module d'élasticité mesuré en fonction de la température et la fréquence de chargement (matériau MR11)

| Fréquence [Hz] | Température [°C] | Module E* [MPa] | Température [°C] | Module E* [MPa] |
|----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 8 | -10 | 21837 | 15 | 12035 |
| 15 | | 22538 | | 13212 |
| 25 | | 23145 | | 14172 |
| 33 | | 23473 | | 14734 |
| 50 | | 24603 | | 16375 |
| 8 | -5 | 19582 | 20 | 8800 |
| 15 | | 20630 | | 10042 |
| 25 | | 21327 | | 10809 |
| 33 | | 21663 | | 11584 |
| 50 | | 23266 | | 12607 |
| 8 | 0 | 17468 | 25 | 6629 |
| 15 | | 18316 | | 7693 |
| 25 | | 19244 | | 8604 |
| 33 | | 19790 | | 9077 |
| 50 | | 21441 | | 10247 |
| 8 | 5 | 14728 | 30 | 4438 |
| 15 | | 15809 | | 4516 |
| 25 | | 16750 | | 6184 |
| 33 | | 17312 | | 6634 |
| 50 | | 19459 | | 7506 |

Tableau 3.2b : Valeur du module d'élasticité mesuré en fonction de la température et la fréquence de (matériau HMT22s)

| Fréquence [Hz] | Température [°C] | Module E* [MPa] | Température [°C] | Module E* [MPa] |
|----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 8 | -10 | 18883 | 20 | 5108 |
| 15 | | 19559 | | 5940 |
| 25 | | 20604 | | 6634 |
| 33 | | 20569 | | 7013 |
| 50 | | 21263 | | 7584 |
| 8 | -5 | 16767 | 25 | 3492 |
| 15 | | 17593 | | 4183 |
| 25 | | 18316 | | 4848 |
| 33 | | 18797 | | 5124 |
| 50 | | 18992 | | 5956 |
| 8 | 0 | 14620 | 30 | 2259 |
| 15 | | 15358 | | 2842 |
| 25 | | 16168 | | 3326 |
| 33 | | 16450 | | 3656 |
| 50 | | 16972 | | 4198 |
| 8 | 5 | 12387 | 35 | 1387 |
| 15 | | 13121 | | 1710 |
| 25 | | 13760 | | 2116 |
| 33 | | 14034 | | 2332 |
| 50 | | 14817 | | 2856 |
| 8 | 10 | 9799 | 40 | 800 |
| 15 | | 10760 | | 1054 |
| 25 | | 11352 | | 1312 |
| 33 | | 11697 | | 1440 |
| 50 | | 12884 | | 1785 |
| 8 | 15 | 7107 | 45 | 442 |
| 15 | | 7927 | | 609 |
| 25 | | 8657 | | 750 |
| 33 | | 9020 | | 841 |
| 50 | | 9672 | | 1038 |

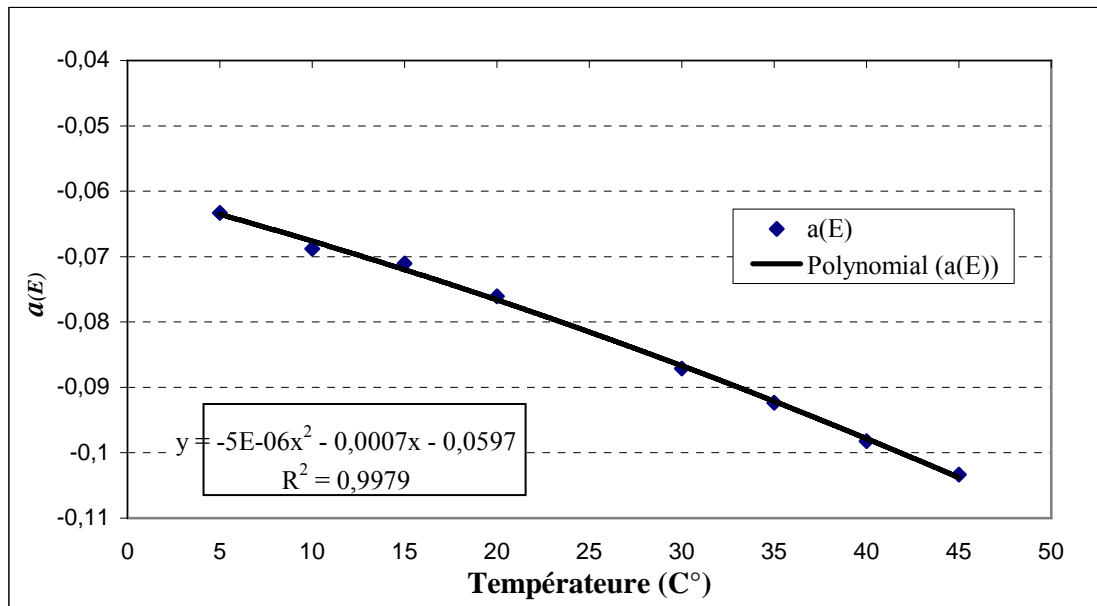


Figure 3.2a : Variation du paramètre $a(E)$ en fonction de la température pour l’enrobé bitumineux de HMT22s

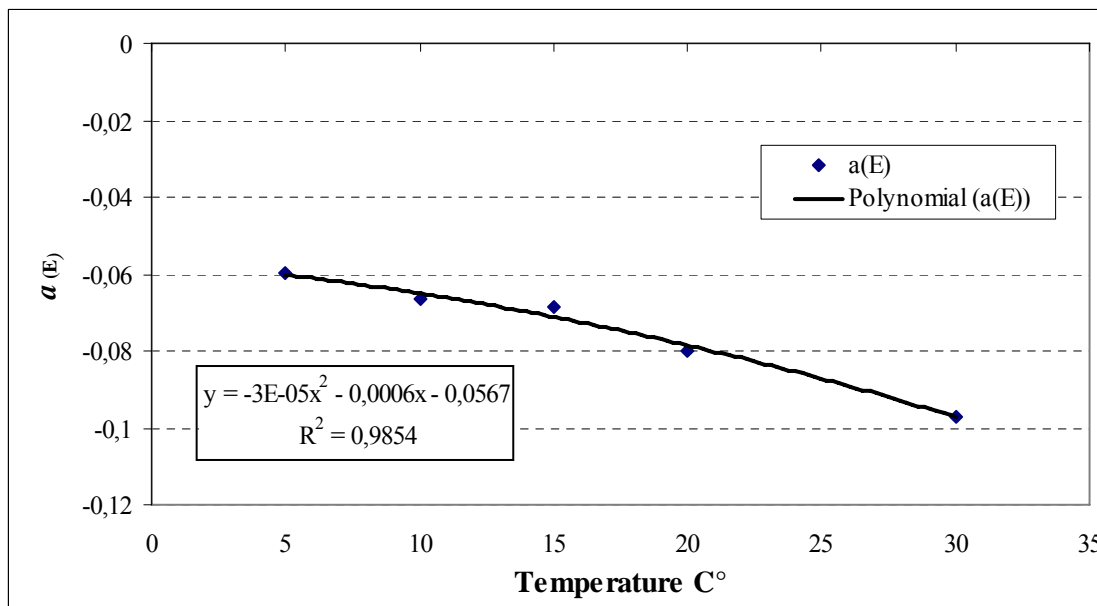


Figure 3.2b : Variation du paramètre $a(E)$ en fonction de la température pour l’enrobé bitumineux de MR11

Partie irréversible

La déformation viscoplastique de l’enrobé est donnée par :

$$\varepsilon_{(t)}^{vp} = A_T \sigma^n \xi^{m+1} \tag{3.1}$$

Les paramètres du modèle (n , m et A_T) sont liés aux propriétés des matériaux et à la température. Le paramètre n contrôle la sensibilité de l’enrobé bitumineux à la contrainte. A_T contrôle sa sensibilité à la température alors que m contrôle sa sensibilité au temps. Pour des

comportements physiquement raisonnables, A_T et n doivent être positifs et m doit être compris entre -1 et 0.

Dans cette étude, ces paramètres ont été déterminés par calage sur les mesures réalisées en vraie grandeur. Les paramètres n et A_T ($A_T = A(a_T)_{vp}^{m+1}$) sont indépendants du temps ; ils sont déterminés à partir de la réponse instantanée.

La détermination des différents paramètres est effectuée en deux étapes. Dans la première, une valeur de -0,5 a été fixée pour m ensuite A_T et n ont été déterminés par calage sur les mesures de la déformation longitudinale en bas des couches de l'enrobé bitumineux (avec une charge/essieu de 11,5 tonnes et une pression de gonflage de 700 kPa à 30°). Les valeurs trouvées pour A_T et n sont données dans le tableau 3.3a. Le tableau 3.3b donne les résultats des mesures et de la modélisation pour la déformation longitudinale

Tableau 3.3a : Valeurs des paramètres pour l'enrobé bitumineux déterminées à 30° C

| Couche de l'enrobé bitumineux de | A_T | n |
|----------------------------------|----------|------|
| HMT22s | 1,2 10-6 | 0,88 |
| MR11 | 1,3 10-6 | 0,89 |

Pour prendre en compte l'influence de la température sur la partie viscoplastique A_T , nous avons utilisé les mesures avec la même charge et la pression de gonflage aux températures 15 et 5°C. Les figures 3.2a et 3.2b donnent la variation de A_T en fonction de la température pour les deux types d'enrobé (le rapport entre $\log A_T$ et la température peut être exprimé par un polynôme du deuxième degré, Chehab, 2003).

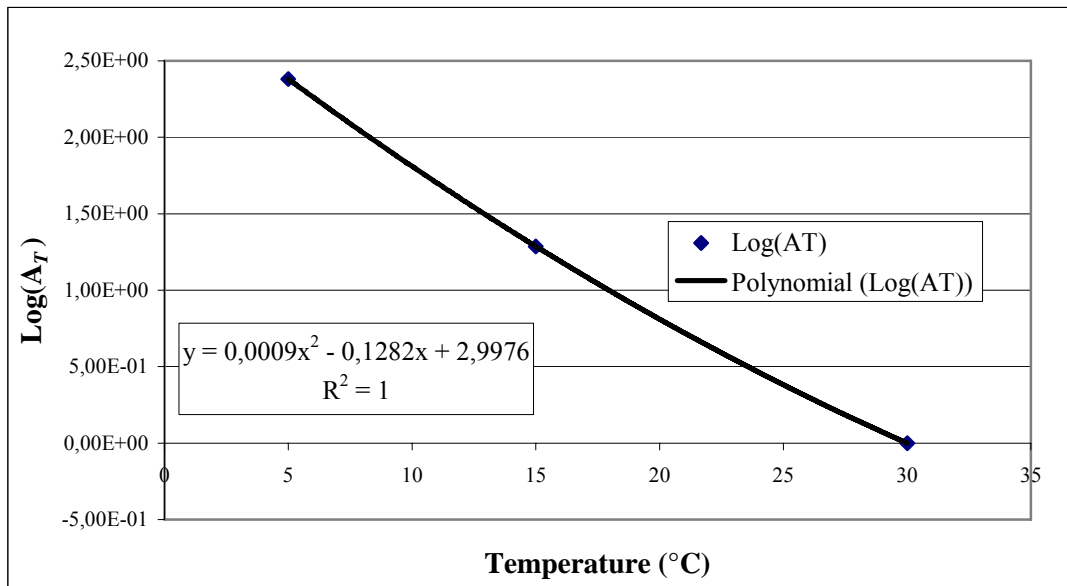


Figure 3.2a : Variation du paramètre A_T avec la température pour l'enrobé bitumineux de MR11

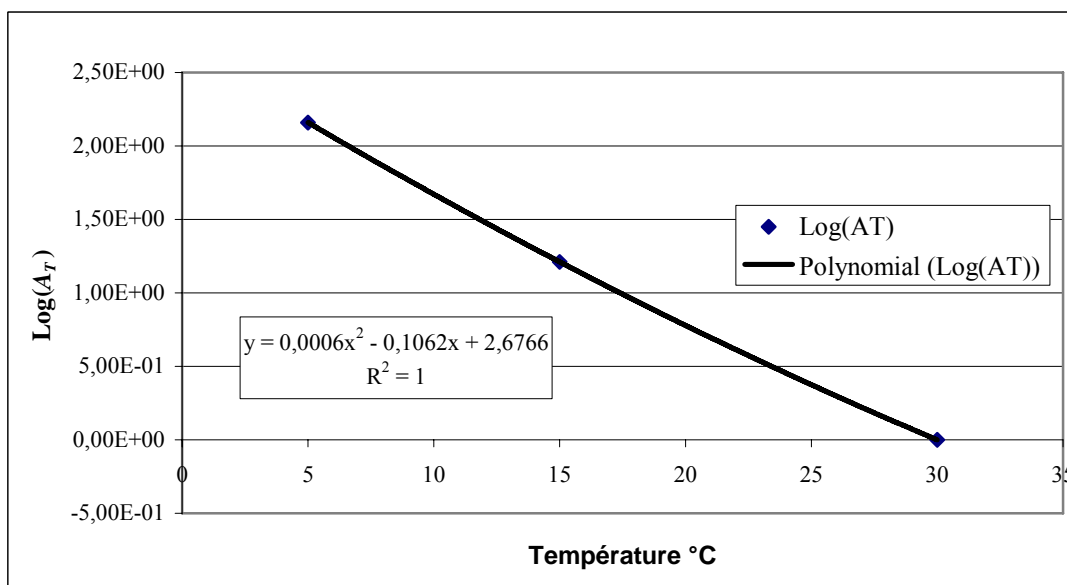


Figure 3.2b : Variation du paramètre A_T avec la température pour l'enrobé bitumineux de HMT22s

Dans la deuxième phase de détermination des paramètres, le paramètre m pour la couche de HMT22S a été déterminé en utilisant le résultat d'un essai de résistance à l'orniérage (la norme française Nf P 98-253.1). (Szydlo et al.2005 ont utilisé les résultats de cet essai pour déterminer les paramètres de leur modèle). Une modélisation 3D a été réalisée pour la simulation de cet essai avec les hypothèses suivantes : Vitesse maximale de 1,6 m/s ; charge de 5 kN ; Pression de gonflage de 600 kPa et température de 60°C. Les dimensions de l'éprouvette sont de 500 mm de longueur, 180 mm de largeur et 100 mm de hauteur. La figure 3.2c illustre la machine d'essai de l'orniérage et la modélisation 3D de l'éprouvette.

L'ajustement a donné $m = -0,51$ pour HMT22s. Le tableau 3.3c donne le taux de l'orniérage avec l'essai et la modélisation.

Tableau 3.3b : Déformation longitudinale en dessous de la couche de la surface (mesurées et modélisation)

| Température (° C) | Déformation (10^{-6}) | |
|-------------------|------------------------------|--------------|
| | Mesures (Perret et al. 2001) | Modélisation |
| 30 | 186 | 186 |
| 15 | 98.5 | 119 |
| 5 | 68.3 | 83.5 |

Tableau 3.3c : Taux d'orniérage avec la modélisation et l'essai de résistance (Nf P 98-253.1)

| Essai à l'orniérage au LAVOC% | Calcul% |
|----------------------------------|---------|
| 6,7 | 6,8 |

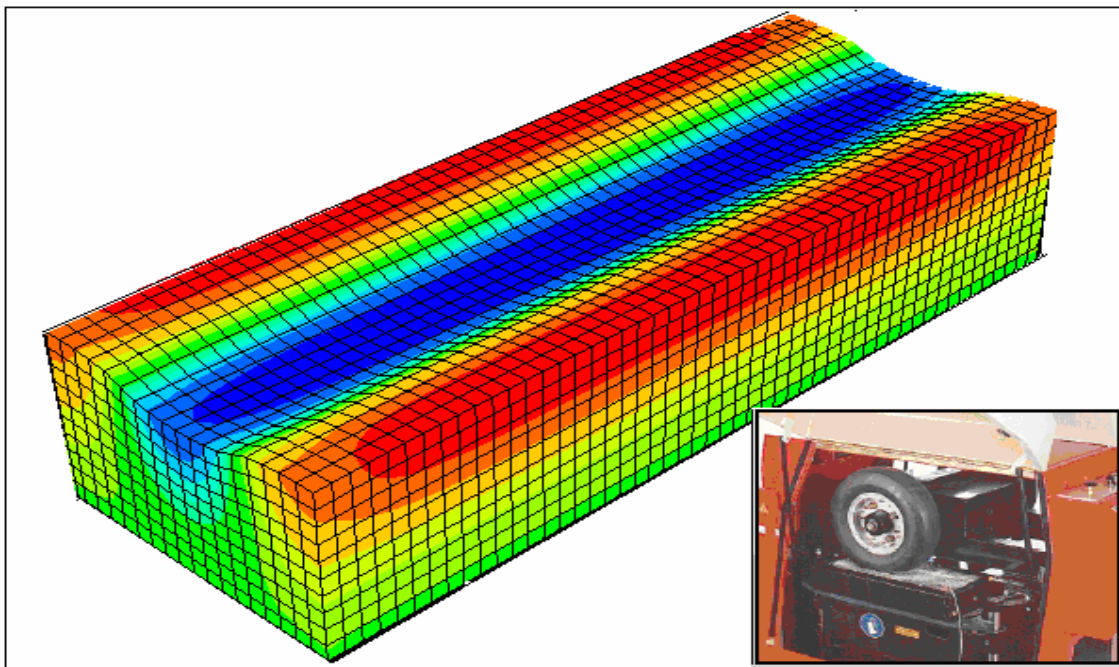


Figure 3.2c : Machine de la résistance de l'orniérage, modélisation 3D de l'éprouvette

3.3.2 Couches inférieures

Les modules d'élasticité pour les couches inférieures sont déterminés à partir des résultats de l'essai de plaque (Perret et al. 2002, 2003). Cet essai a donné les valeurs suivantes $E = 90$ MPa pour la couche de sol de support.

$E = 270$ MPa pour la couche de base de grave.

Pour les matériaux des couches d'assise, le coefficient de Poisson est supposé constant ($\nu = 0,35$).

La cohésion c et l'angle de frottement ϕ des couches inférieures ont été déterminés à partir des essais triaxiaux. Le tableau 3.4 donne les valeurs trouvées.

La couche de fond en béton est supposée élastique avec un module d'élasticité E de 20000MPa et un coefficient de Poisson ν de 0,15 (Perret et al. 2002).

Tableau 3.4 : Paramètres de résistance pour les couches d'assise et de sol de support

| Couche | l'angle de frottement ϕ (°) | Cohésion c (kPa) |
|-------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| D'assise | 35 | 10 |
| de sol de support | 30 | 1 |

3.4 Validation du modèle

Une modélisation 3-D a été utilisée pour analyser la réponse de la chaussée sous les conditions d'essai : - pression de gonflage de 600, 700, 800 kPa, - charge de 11,5 et 8 tonnes, - température de (5, 15, 30°C) et deux types de pneus (super single et jumeau). Les géométries de la surface et la pression de contact utilisées dans l'analyse pour les différentes conditions sont données dans la figure 3.3. L'empreinte du pneu à la pression de gonflage de 700 kPa a été déterminée à partir des interpolations réalisées entre les empreintes à 600 et à 800 kPa réalisées au LAVOC. Des éléments C3D8R à 8 nœuds et intégration réduit (reduced integration) ont été utilisés dans la modélisation. Pour des raisons de symétrie, seul un quart de la section de la chaussée a été modélisé. Le maillage utilisé et les conditions aux limites sont illustrés à la figure 3.3. Il comporte 28789 éléments. Le chargement est appliqué sous forme d'une pression à la surface de contact du pneu. L'interface entre les couches est supposée parfaite.

| | Charge par essieu : 11,5 tonnes | Charge par essieu : 8 tonnes |
|--------------------------------|--|---|
| Pression de gonflage : 800 kPa | <p>760 kPa</p> <p>26.7 cm</p> <p>28.3 cm</p> | <p>655 kPa</p> <p>21.7 cm</p> <p>28.1 cm</p> |
| Pression de gonflage : 700 kPa | <p>729 kPa</p> <p>27.8 cm</p> <p>28.3 cm</p> | <p>617 kPa</p> <p>23.15 cm</p> <p>28.0 cm</p> |
| Pression de gonflage : 600 kPa | <p>699 kPa</p> <p>29 cm</p> <p>28.4 cm</p> | <p>509 kPa</p> <p>24.6 cm</p> <p>28.1 cm</p> |

Figure 3.3a : Surface du chargement appliqué par le pneu (basées sur les mesures de l’empreinte réelle réalisées au LAVOV)

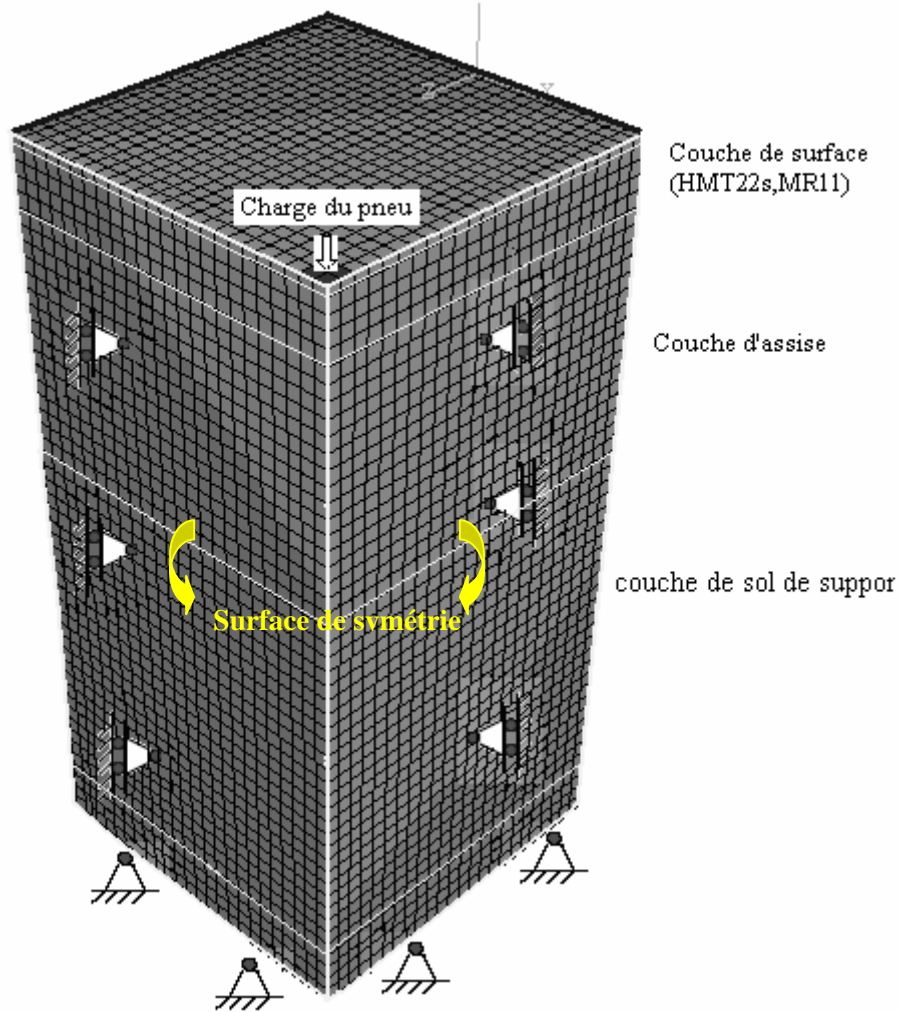


Figure 3.3b : Section de la chaussée avec modélisation 3D

3.4.1 Déformation à la base de la couche de surface

Les figures 3.5a à 3.6c montrent la déformation longitudinale à la base de la couche de surface obtenue par la modélisation et les essais. Les tableaux 3.6a et 3.6b donnent les résultats des calculs pour les différentes conditions de chargement.

On constate que l'écart entre les résultats de modélisation et des mesures dépend de la température. La modélisation donne des résultats proches des mesures à 30°C avec un écart inférieur à 6,2% pour un pneu jumeau et inférieur à 7,7% pour un pneu super single. Cet écart croît de 6,2% à 19,2% quand la température décroît de 30°C à 5°C (avec un pneu jumeau).

L'écart entre la modélisation et les mesures dépend également de la pression de pneu et de l'intensité de la charge. L'augmentation de la pression de pneu de 600 à 800 kPa (à 30°C)

induit une augmentation de l'écart avec un pneu super single de 2,6% à 7,7% avec une charge/essieu de 8 tonnes et de 3% à 8% avec une charge/essieu de 11,5 tonnes. Pour un pneu jumeau, l'écart varie avec l'augmentation de la pression de pneu de 600 à 800 kPa de : 0,9% à 6,2% avec une charge de 8 tonnes et de 0,3% à 6,1% avec une charge de 11,5 tonnes.

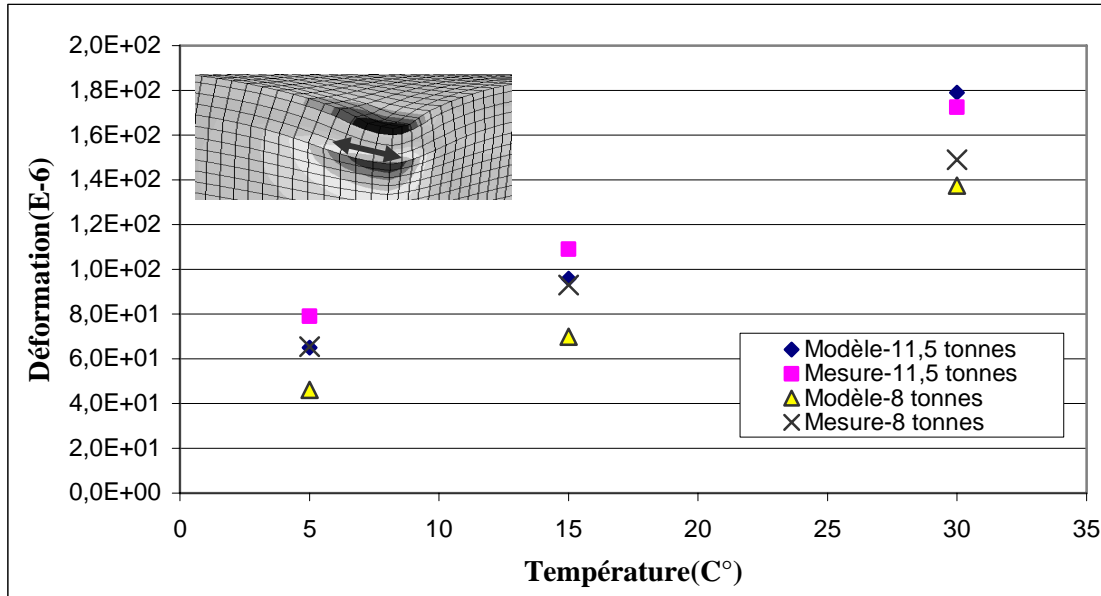


Figure 3.5a : Validation du modèle : déformation longitudinale à la base de la couche de surface (pneu super single, pression de gonflage = 600 kPa)

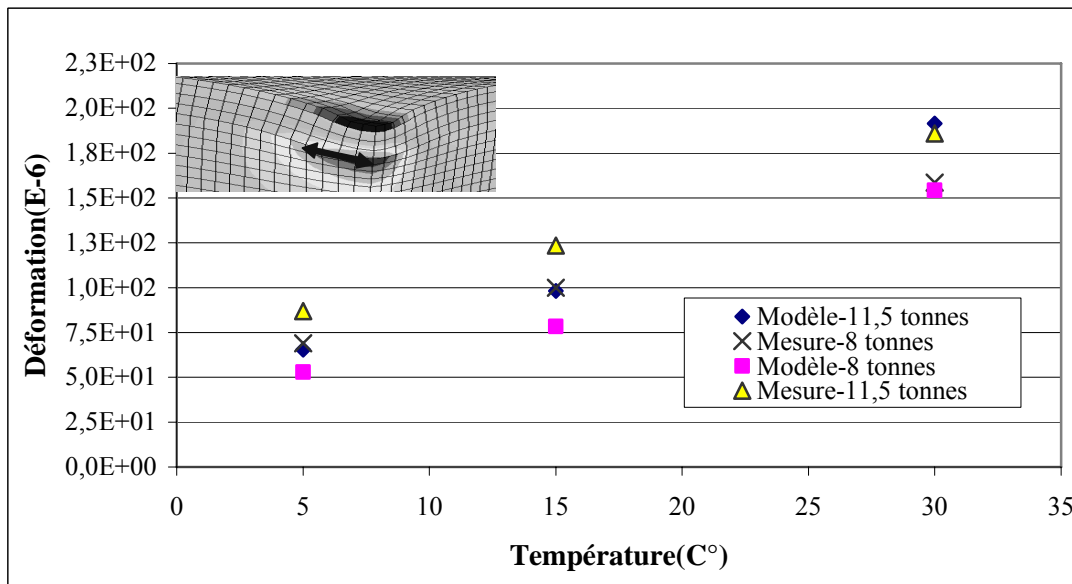


Figure 3.5b : Validation du modèle : déformation longitudinale à la base de la couche de surface (pneu super single, pression de gonflage = 800 kPa)

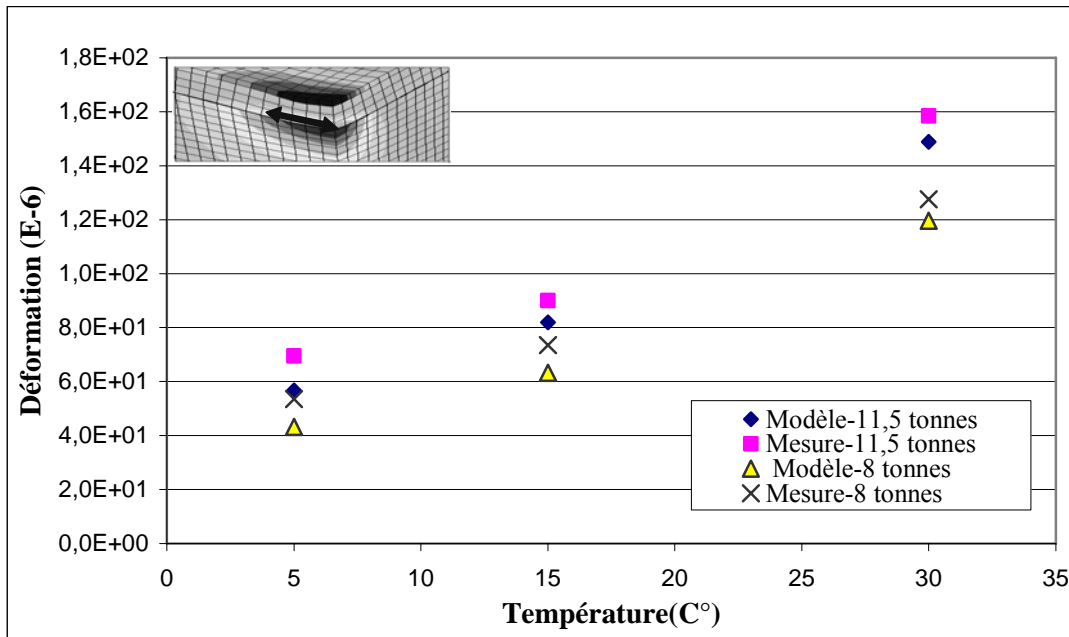


Figure 3.6a : Validation du modèle : déformation longitudinale à la base de la couche de surface en fonction de la température (pneu jumeau, pression de gonflage = 600 kPa,)

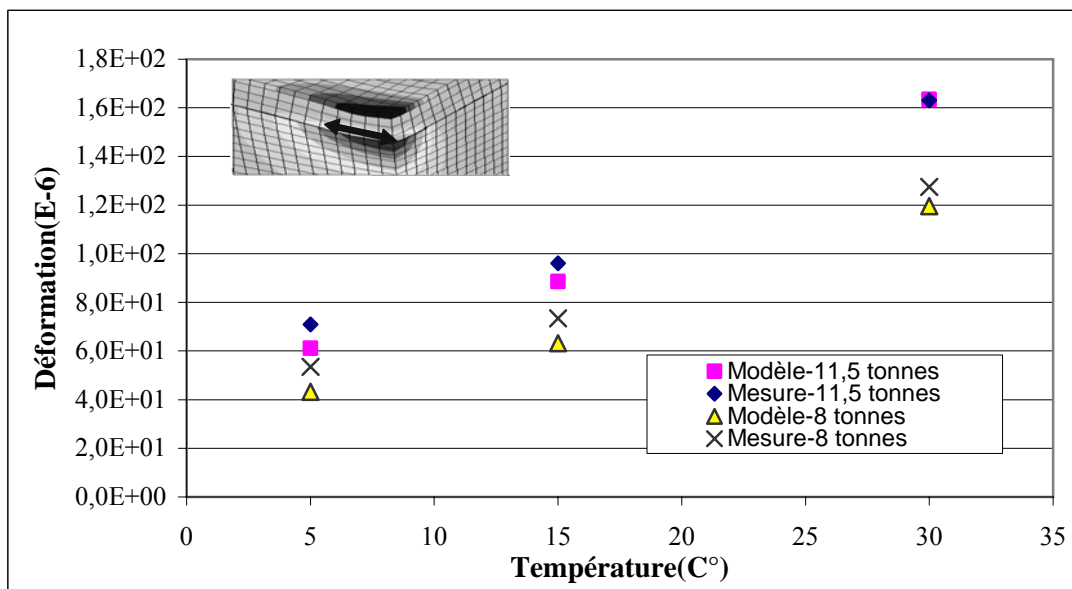


Figure 3.6b : Validation du modèle : déformation longitudinale à la base de la couche de surface (pneu jumeau, pression de gonflage = 700 kPa).

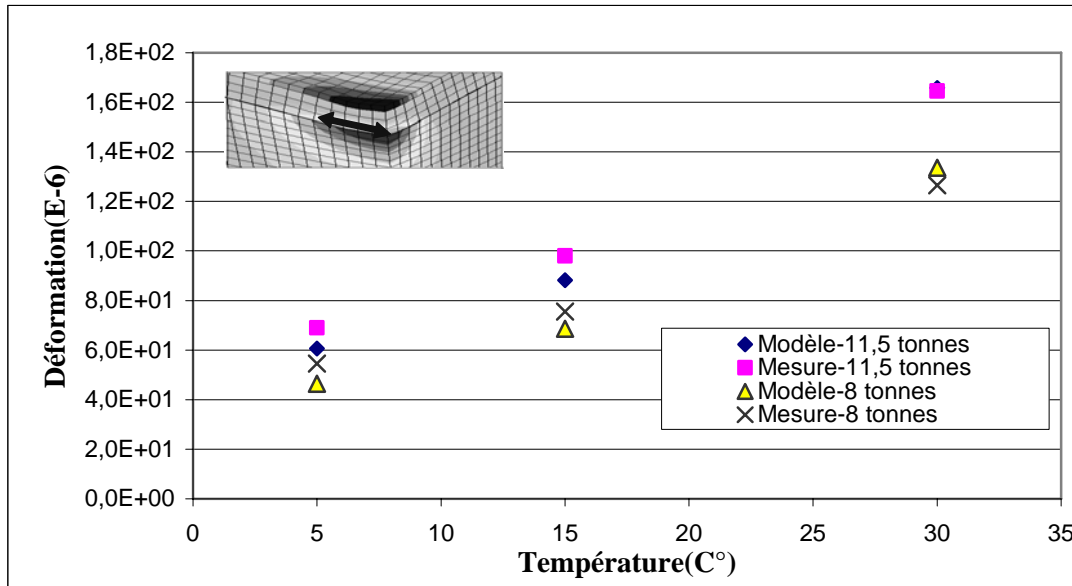


Figure 3.6c : Validation du modèle : déformation longitudinale à la base de la couche de surface (pneu jumeau pression de gonflage = 800 kPa).

Tableau 3.6a : Validation du modèle: déformation longitudinale à la base de la couche de surface pour un pneu jumeau

| Charge/essieu (Tonne) | Pression de gonflage (kPa) | Température (C°) | Déformation longitudinale (E-6) | | Ecart % |
|-----------------------|----------------------------|------------------|---------------------------------|--------|---------|
| | | | Modèle | Mesure | |
| (11,5) | 600 | 30 | 148,8 | 158,5 | 6,1 |
| | | 15 | 82,0 | 90 | 8,9 |
| | | 5 | 56,7 | 69,5 | 18,5 |
| | 700 | 30 | 163,4 | 163 | -0,3 |
| | | 15 | 88,5 | 96 | 7,8 |
| | | 5 | 61,1 | 71 | 13,9 |
| | 800 | 30 | 165,9 | 164,5 | -0,8 |
| | | 15 | 88,2 | 98 | 10,0 |
| | | 5 | 60,6 | 69 | 12,2 |
| 8 | 600 | 30 | 119,6 | 127,5 | 6,2 |
| | | 15 | 63,2 | 73,5 | 14,0 |
| | | 5 | 43,2 | 53,5 | 19,2 |
| | 700 | 30 | 127,4 | 128,5 | 0,9 |
| | | 15 | 66,2 | 76 | 12,9 |
| | | 5 | 45,0 | 54,5 | 17,5 |
| | 800 | 30 | 133,6 | 126,5 | -5,6 |
| | | 15 | 68,7 | 75,5 | 9,1 |
| | | 5 | 46,5 | 54,5 | 14,7 |

Tableau 3.6b : Validation du modèle numérique: déformation longitudinale en bas de la couche de surface pour un pneu super single

| Charge par essieu (tonne) | Pression de gonflage (kPa) | Température (C°) | Déformation longitudinale (E-6) | | Ecart % |
|---------------------------|----------------------------|------------------|---------------------------------|--------|---------|
| | | | modèle | Mesure | |
| 11,5 | 600 | 30 | 178,9 | 172,5 | -3,8 |
| | | 15 | 95,8 | 109 | 12,1 |
| | | 5 | 65,04 | 79 | 17,7 |
| | 800 | 30 | 191,6 | 186 | -3,0 |
| | | 15 | 98,2 | 123,5 | 20,5 |
| | | 5 | 65,4 | 87 | 24,8 |
| 8 | 600 | 30 | 137,5 | 149 | 7,7 |
| | | 15 | 69,9 | 93 | 24,8 |
| | | 5 | 46,1 | 65,5 | 29,6 |
| | 800 | 30 | 154,3 | 158,5 | 2,6 |
| | | 15 | 78,5 | 100 | 21,5 |
| | | 5 | 52,97 | 69 | 23,2 |

3.4.2 Déplacement vertical

Des mesures du déplacement vertical à la surface de la chaussée ont été réalisées avec une charge de 11,5 tonnes/essieu et une pression de gonflage de 800 kPa pour un pneu super single et pour une charge de 8 tonne/essieu et une pression de gonflage de 600 kPa pour un pneu jumeau. La figure 3.7 présente une comparaison entre la modélisation et les mesures. On constate que l'écart maximal entre la modélisation et les mesures est d'environ 9% pour une température de 30°C.

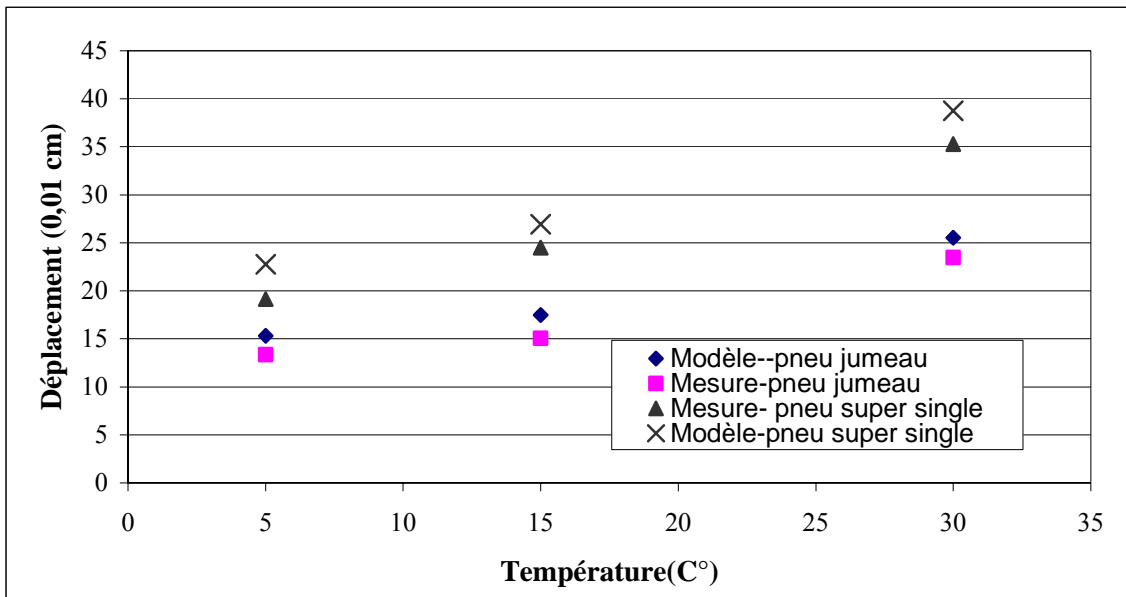


Figure3.7 : Validation du modèle numérique: déplacement vertical de la surface de la chaussée pour les deux pneus (pneu super single : Charge/essieu = 11,5 tonnes, pression de gonflage = 800 kPa ; pneu jumelle : charge/essieu = 8 tonnes, pression de gonflage = 600 kPa).

Pour conclure cette partie, les tests de validation montrent que la modélisation reproduit d'une manière satisfaisante le comportement de la chaussée sous différentes conditions de sollicitations (charge/essieu; pression de gonflage; type de pneus et température).

3.4.3 Comportement à long terme

La circulation continue dans la direction longitudinale peut être traitée à l'aide d'une modélisation 2D. Dans l'analyse 2D (déformations planes) on utilise des éléments CPE4R à 4 nœuds et une intégration réduite. Les conditions aux limites sont illustrées à la figure 3.8a Le chargement est appliqué à l'aide d'une force sur la surface de contact du pneu. Un maillage effectué au voisinage de la charge. L'interface entre les couches est supposée parfaite.

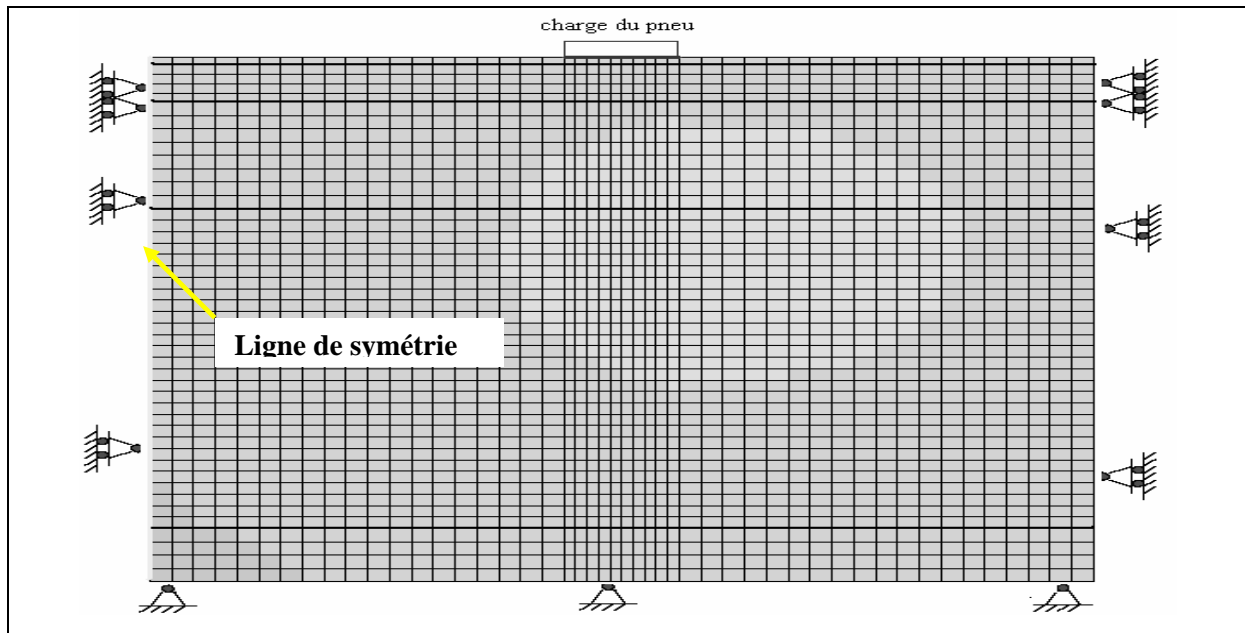


Figure 3.8a : Section de la chaussée avec modélisation 2D

La modélisation s'appuie sur deux essais réalisés sur des chaussées HMT22-4 et HMT22-5. La figure 3.8b donne l'évolution de l'orniérage en fonction du nombre de passages. On distingue deux phases de développement de l'orniérage. L'une correspond respectivement à l'initiation et l'autre à la propagation. La phase d'initiation correspond à l'orniérage par densification de l'enrobé bitumineux (Kandhal et al.1993) alors que la phase de propagation est relative au fluage. Le taux de développement de l'orniérage dans la phase d'initiation est très important par rapport à celui de la phase de propagation (Lenngren, 2004) (93 fois plus grand).

Les figures 3.8c et 3.8d donnent une comparaison entre la modélisation et les mesures pour les deux phases. On constate que les résultats numériques sont proches des mesures, pour la phase d'initiation en particulier l'essai HMT-5. Pour la phase de propagation de l'orniérage, les résultats numériques se situent entre les résultats des deux essais. L'évolution du taux de développement de l'orniérage obtenu expérimentalement est très proche de celui obtenu numériquement. L'écart maximum entre les profondeurs totales expérimental et numérique est inférieur à 10%.

La figure 3.8e donne l'évolution de la forme de l'orniérage pour différents niveaux de passages. On note un bon accord sur la forme de l'orniérage entre les essais et la modélisation, notamment en ce qui concerne le bourrelet.

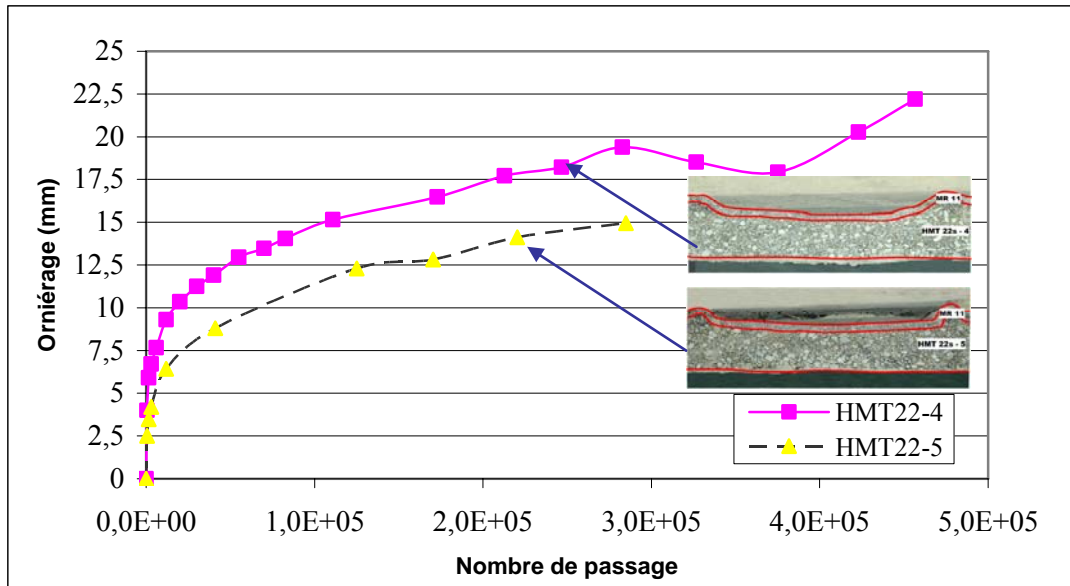


Figure3.8b : Développement de l’orniéage en fonction de nombre de passage (pneu super single, pression de gonflage = 800 kPa, Charge/essieu = 11,5 tonnes à 50°C - essais réalisés, par Perret et al. 2001, 2003).

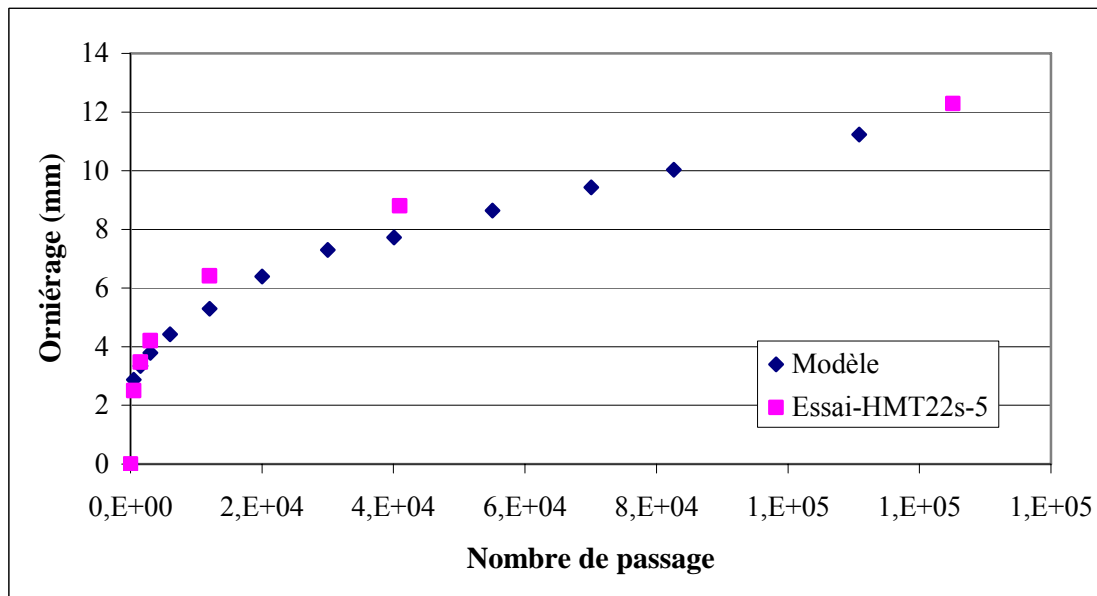


Figure3.8c : Comparaison entre le modèle et les mesures pour la phase d’initiation de développement de l’orniéage (pneu super single, pression de gonflage = 800 kPa, Charge/essieu = 11,5 tonnes à 50°C - essais réalisés, par Perret et al. 2001, 2003).

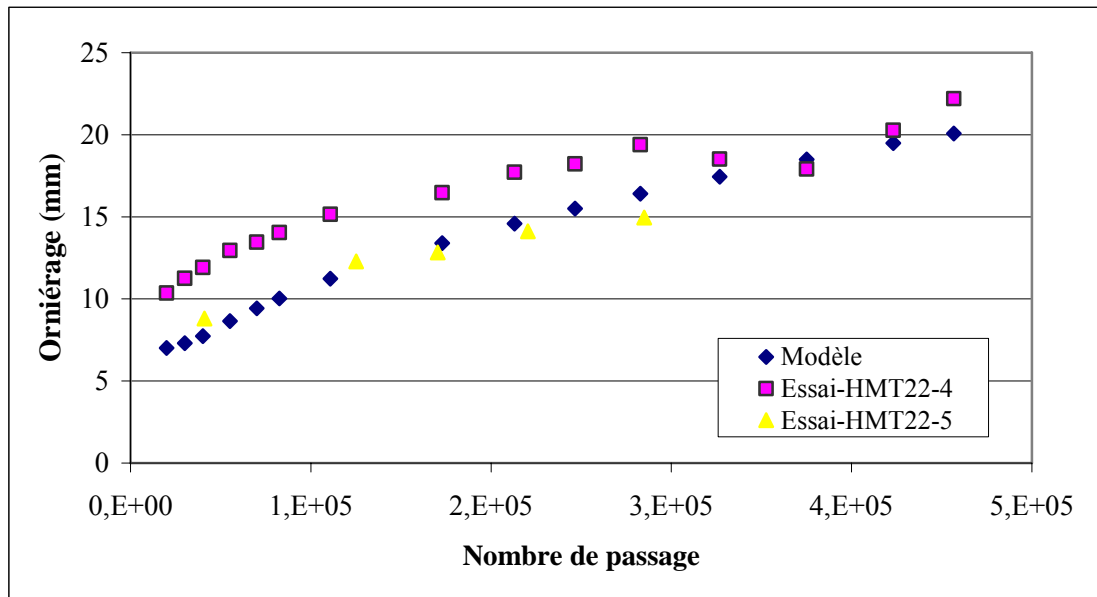


Figure 3.8d : Comparaison entre le modèle et les mesures pour la phase de propagation de développement de l'orniéage (pneu super single, pression de gonflage = 800 kPa, Charge/essieu = 11,5 tonnes à 50°C - essais réalisés, par Perret et al. 2001, 2003)

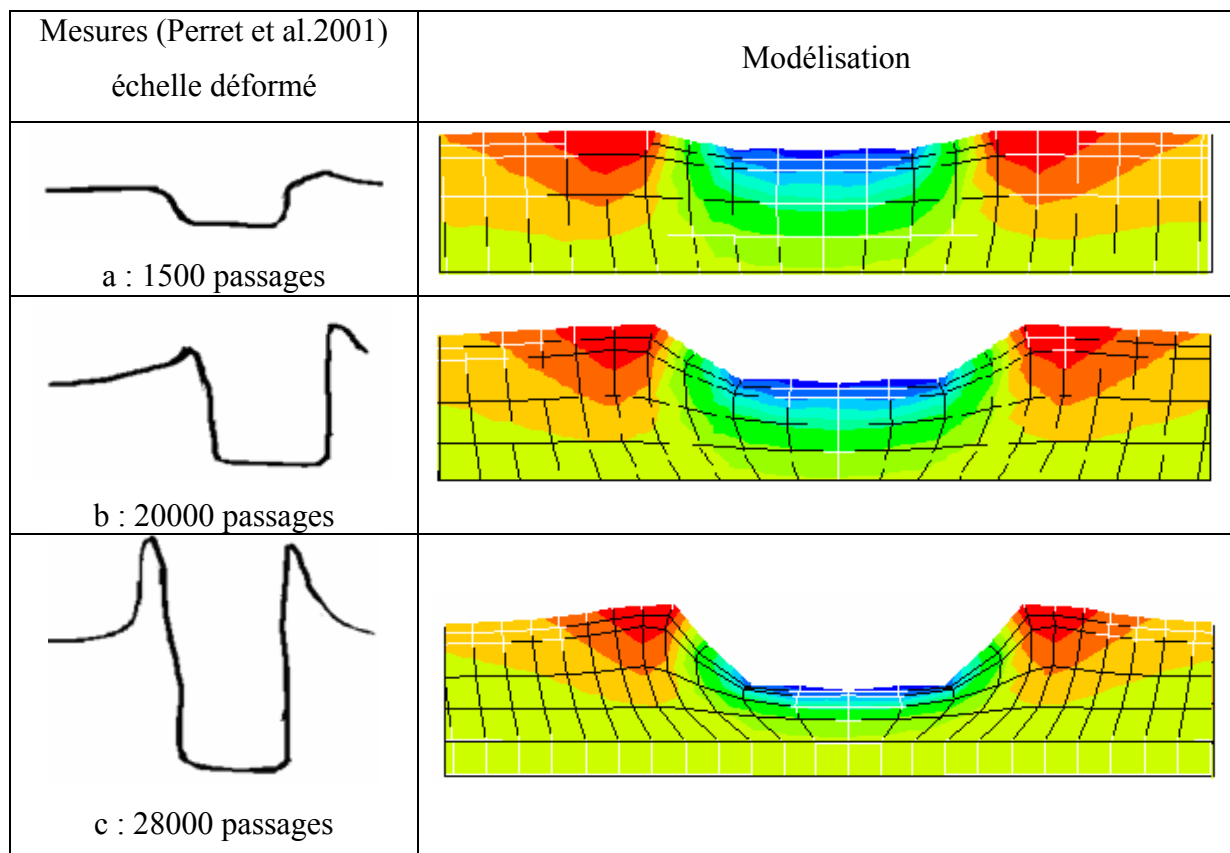


Figure 3.8e : Forme de l'orniéage pour différents nombres de passages (pneu super single, pression de gonflage = 800 kPa, Charge/essieu = 11,5 tonnes à 50°C - essais réalisés, par Perret et al. 2001, 2003)

3.5 Conclusions

Ce chapitre a comporté une validation du modèle numérique présenté au second chapitre sur des essais en vraie grandeur réalisés au Laboratoire LAVOC. Les paramètres du modèle ont été déterminés à partir des essais en laboratoire et en vraie grandeur.

La validation a été effectuée sur des essais avec des mesures instantanées et à long terme (orniérage) pour différentes conditions du chargement et de température. Les tests de validation montrent que le modèle reproduit d'une manière satisfaisante le comportement de la chaussée à court et à long terme.

Le modèle sera utilisé dans le chapitre suivant pour analyser d'une manière approfondie les mécanismes du développement de l'orniérage et pour étudier l'influence des divers facteurs sur ce développement.

Chapitre 4

Etude paramétrique et applications

4.1. Introduction

Le chapitre précédent a montré qu'une modélisation élasto-viscoplastique pour les couches en enrobé bitumineux et élasto-plastique pour les couches inférieures reproduit d'une manière satisfaisante la réponse des chaussées sous différentes conditions de sollicitations en particulier la formation et le développement de l'orniérage.

L'orniérage est affecté par des facteurs liés au trafic (type du pneu, charge par essieu, pression de gonflage et déplacement transversal ...), à l'environnement (variation saisonnière de la température et de l'humidité) et aux propriétés des matériaux des chaussées. Ce chapitre a pour but d'évaluer l'effet de certains de ces facteurs sur la formation et le développement de l'orniérage. Ceci nous permet de mieux comprendre ce phénomène et d'apporter des éléments pour l'entretien et la réparation des chaussées.

4.2. Influence des paramètres liés au trafic

4.2.1 Nombre de passages

La figure 4.1a illustre l'évolution de l'orniérage en fonction du nombre de passages. On constate que l'orniérage se développe en deux phases, une phase d'initiation et une phase de propagation : la première est liée à la densification dans les couches de la chaussée tandis que la deuxième résulte des déformations de fluage dans la couche de surface. La figure 4.1b montre l'influence du nombre de passages sur la déformation de fluage dans la couche d'enrobé bitumineux. On constate que la déformation de fluage se développe fortement en fonction du nombre de passages. La déformation plastique dans les couches inférieures est affectée par la déformation de la couche en enrobé bitumineux.

Puisque la déformation dans cette dernière dépend du nombre de passages, la déformation dans les couches inférieures est aussi affectée par ce facteur. La figure 4.1c présente le développement de cette déformation quand le nombre de passages passe de 1500 à 282772.

Le bourrelet accompagnant l'orniérage se forme dans la phase de propagation. La figure 4.1d illustre le développement de ce bourrelet en fonction du nombre de passage ; sur cette figure on donne également la forme de l'orniérage observée en laboratoire (Perret et al. 2001)

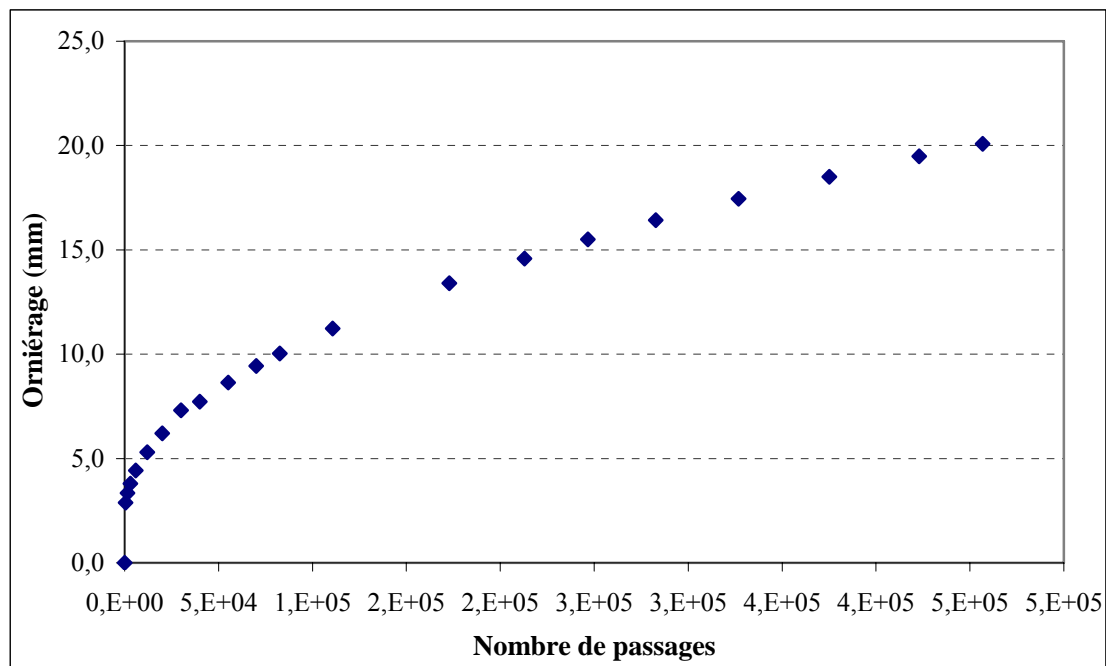


Figure 4.1a : Influence du nombre de passages sur l'orniérage (pneu super single, pression de gonflage = 800 kPa, Charge/essieu = 11,5 tonnes à 50°C)

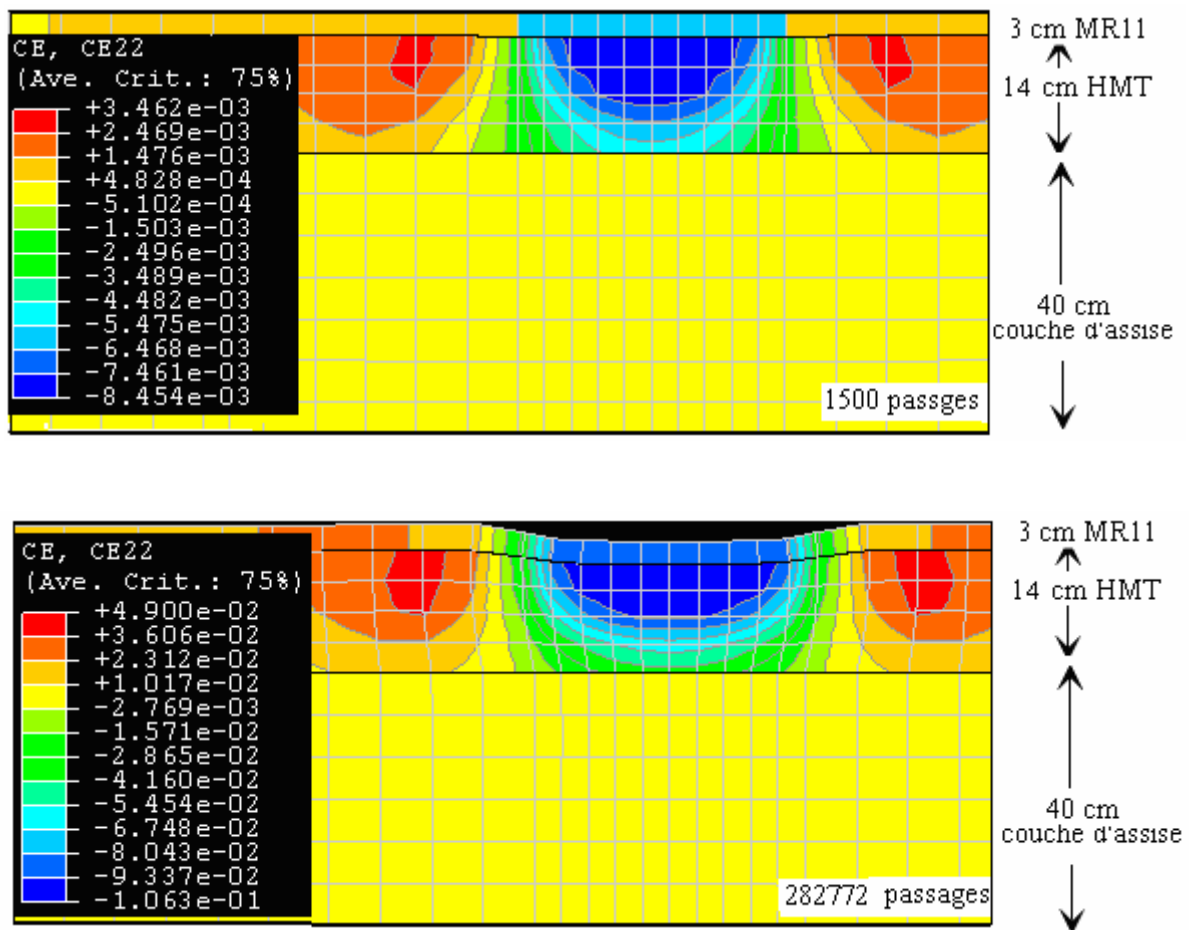


Figure 4.1b : Influence du nombre de passages sur la déformation de fluage dans la couche d'enrobé bitumineux.

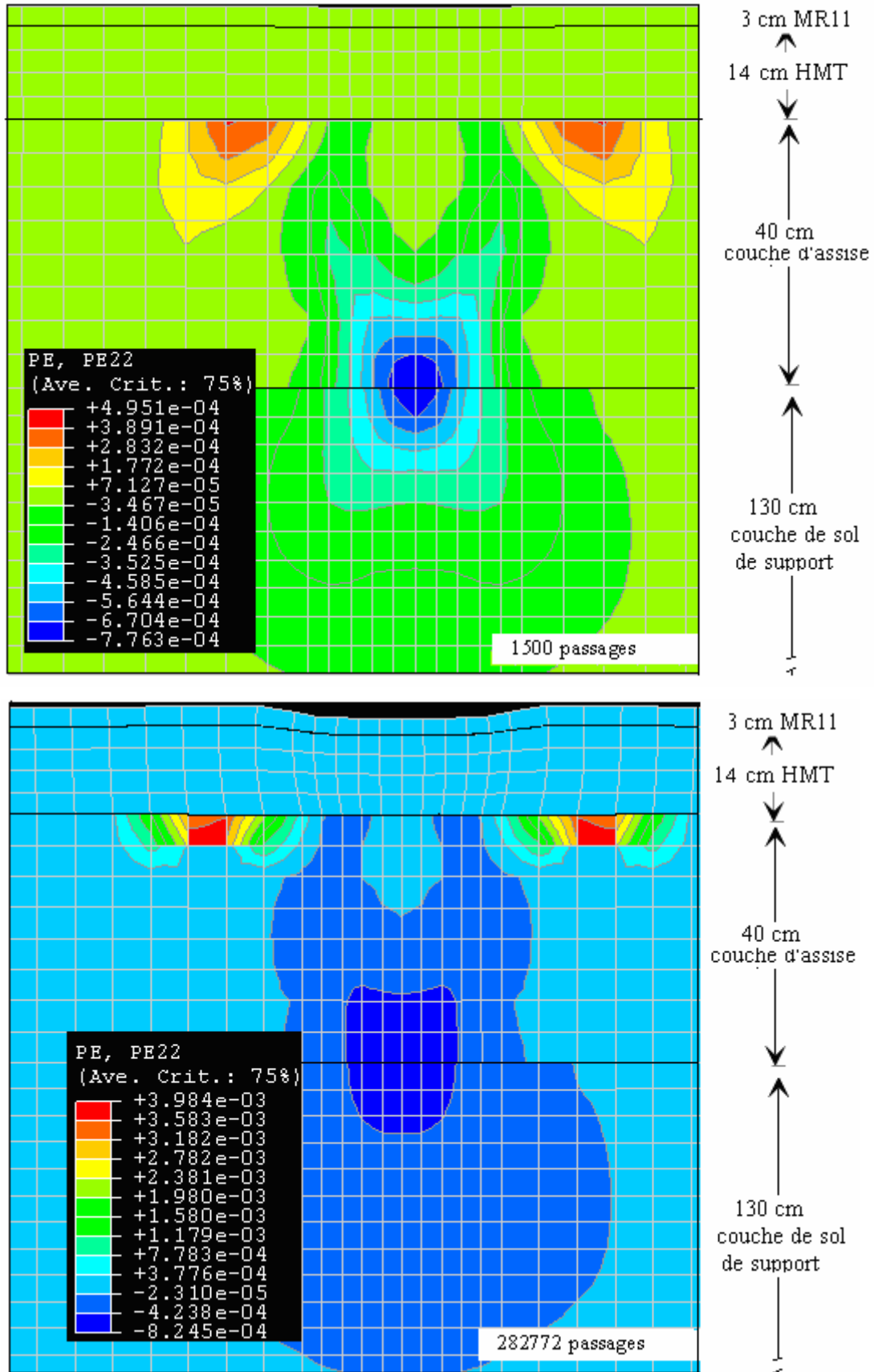


Figure 4.1c : Influence du nombre de passages sur la déformation plastique dans les couches inférieures

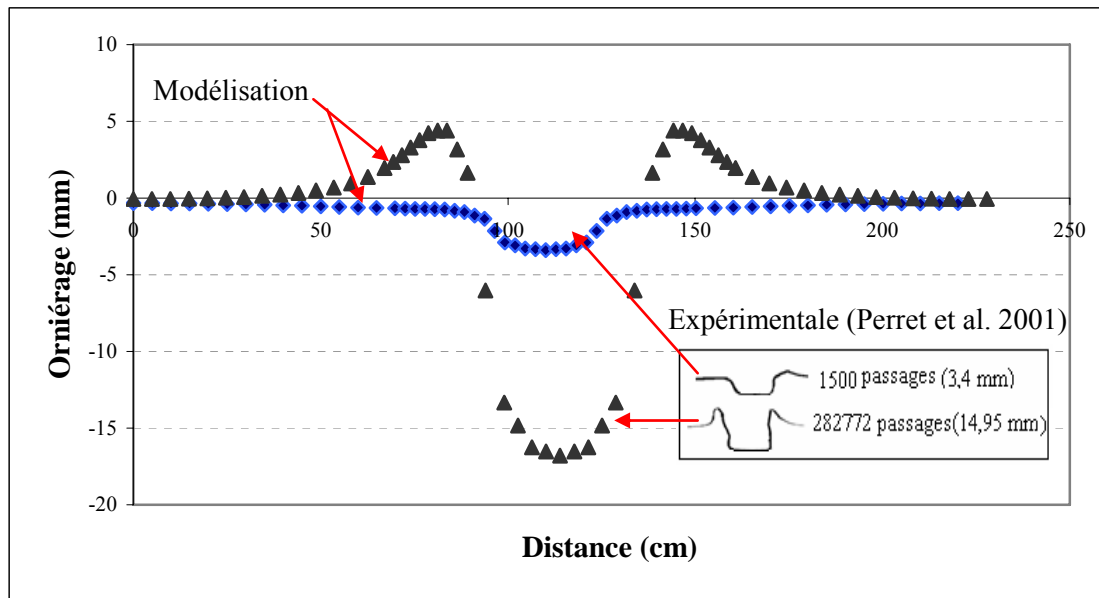


Figure 4.1d : Influence du nombre de passages sur le développement de l'orniérage.

4.2.2 Charge/essieu

La figure 4.2 illustre l'influence de la charge/essieu sur le développement de l'orniérage pour un pneu super single (pression de gonflage de 800 kPa à 30°C).

On note que l'orniérage croît 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).

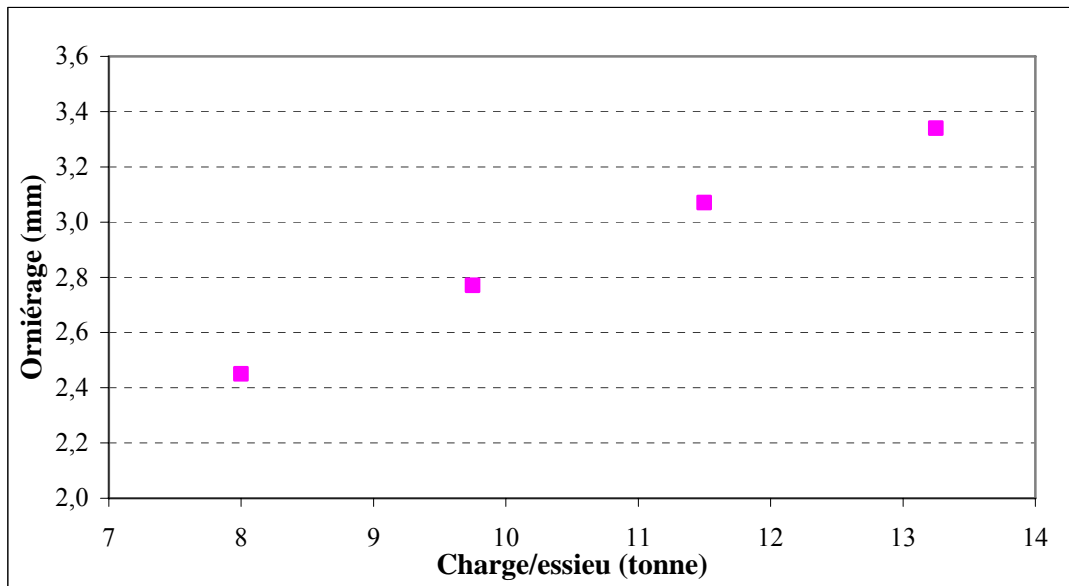


Figure 4.2 : Influence de la charge/essieu sur l'orniérage (pneu super single, pression de gonflage = 800 kPa)

4.2.3 Pression de gonflage

La figure 4.3 illustre l'influence de la pression de gonflage sur le développement de l'orniérage pour un pneu super single (charge/essieu de 11,5 tonnes à 30°C).

On constate que l'orniérage croît d'une manière modérée avec l'augmentation de cette pression. En effet, l'augmentation de la pression de gonflage, à charge/essieu constante, réduit la surface de contact, ce qui a pour conséquence d'augmenter la concentration des contraintes et donc d'augmenter la déformation des chaussées et l'orniérage. Les résultats numériques montrent que l'augmentation de la pression de gonflage de 600 à 800 kPa (34%) à une charge/essieu de 11,5 tonnes fait augmenter l'orniérage de 6%. Seebaly et al. (1992) ont également montré qu'une augmentation de la pression de gonflage a un faible effet pour les chaussées souples épaisses (≥ 170 mm) (ce qui est le cas de la couche de surface utilisée dans ce travail).

On constate que le développement de l'orniérage est plus sensible à la charge/essieu en comparaison avec l'effet de la pression de gonflage. Cette constatation est confirmée expérimentalement par Perret et al. (2001, 2003). Les auteurs montrent que l'augmentation de la charge/essieu de 8 à 11,5 tonnes induit une augmentation de la déformation longitudinale en dessous de la couche de surface d'une manière plus importante qu'avec l'augmentation de la pression de gonflage de 600 à 800 kPa.

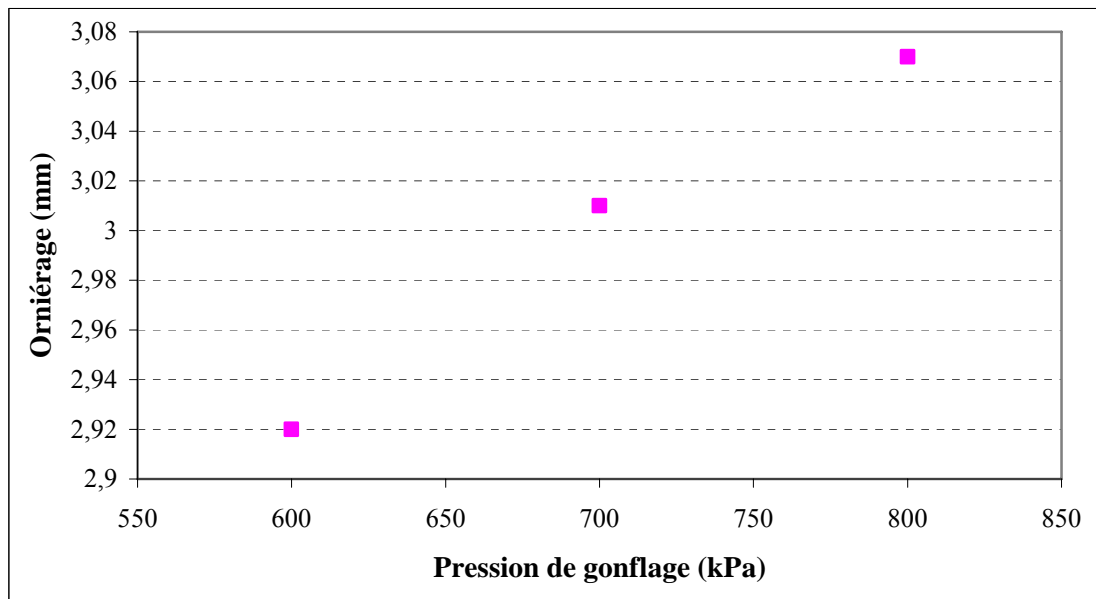


Figure 4.3 : Influence de la pression de gonflage sur l'orniérage (pneu super single, charge/essieu = 11,5 tonnes)

4.2.4 Type de pneu

La figure 4.4 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. 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 4.4).

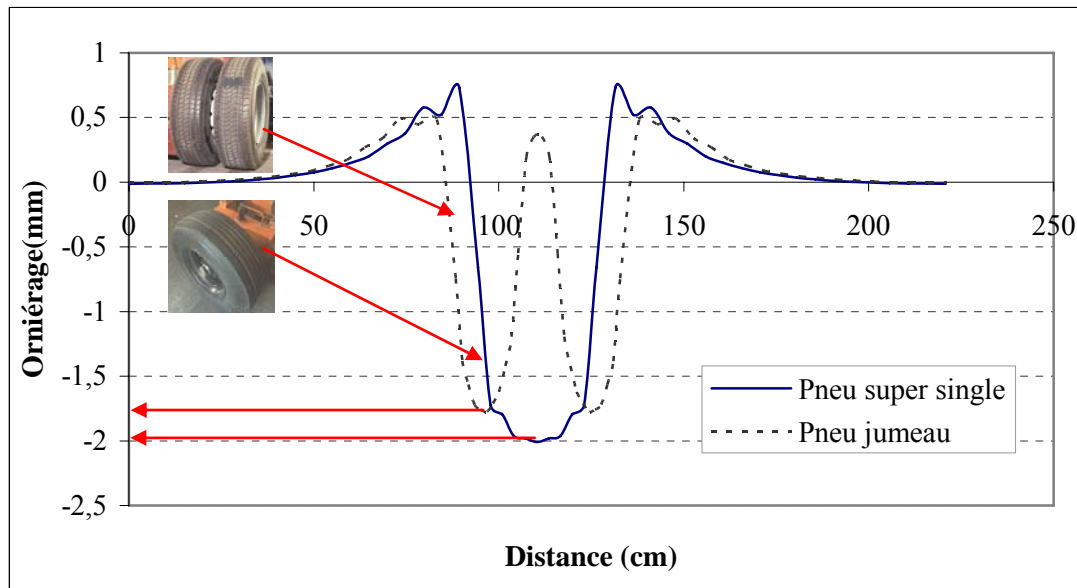


Figure 4.4 : Influence du type de pneu sur la forme de l'orniérage

4.2.5 Déplacement transversal (wander)

Des observations sur des chaussées en service ont montré que la circulation de véhicules sur la chaussées comporte une variation transversale avec une répartition qui suit statistiquement une distribution normale logarithmique à trois paramètres. Elle est caractérisée par la déviation standard qui est en fonction de la largeur de la voie. Pour une voie de 3 à 3,5 m, le déplacement transversal moyen est 0,4 m avec une déviation standard de 0,24 à 0,29 m (White et al. 2002 et Wardle et al. 2003).

Afin d'étudier l'influence du déplacement transversal, nous supposons que le déplacement suit une distribution normale logarithmique :

$$f_x = a e^{(-0,5(x-x_0)/b)^2} \tag{1.4}$$

a, b, x_0 sont des paramètres de forme (figure 4.5a). Le temps de chargement peut être exprimé sous la forme :

$$t_x = \int_{x-w/2}^{x+w/2} a e^{-0,5(x-x_0)/b)^2} dx \tag{1.5}$$

w désigne la largeur de voie.

Avec un déplacement transversal de 0,4 m et $w = 26,7$ cm (charge/essieu de 11,5 tonnes et pression de gonflage de 800 kPa), la zone de circulation peut être divisée en trois parties :

- une zone centrale avec un temps de passage de 75% du temps total;
- une zone extérieure à droite avec un temps de passage du 15% du temps total;
- une zone intérieure à gauche avec un temps de passage du 10% du temps total.

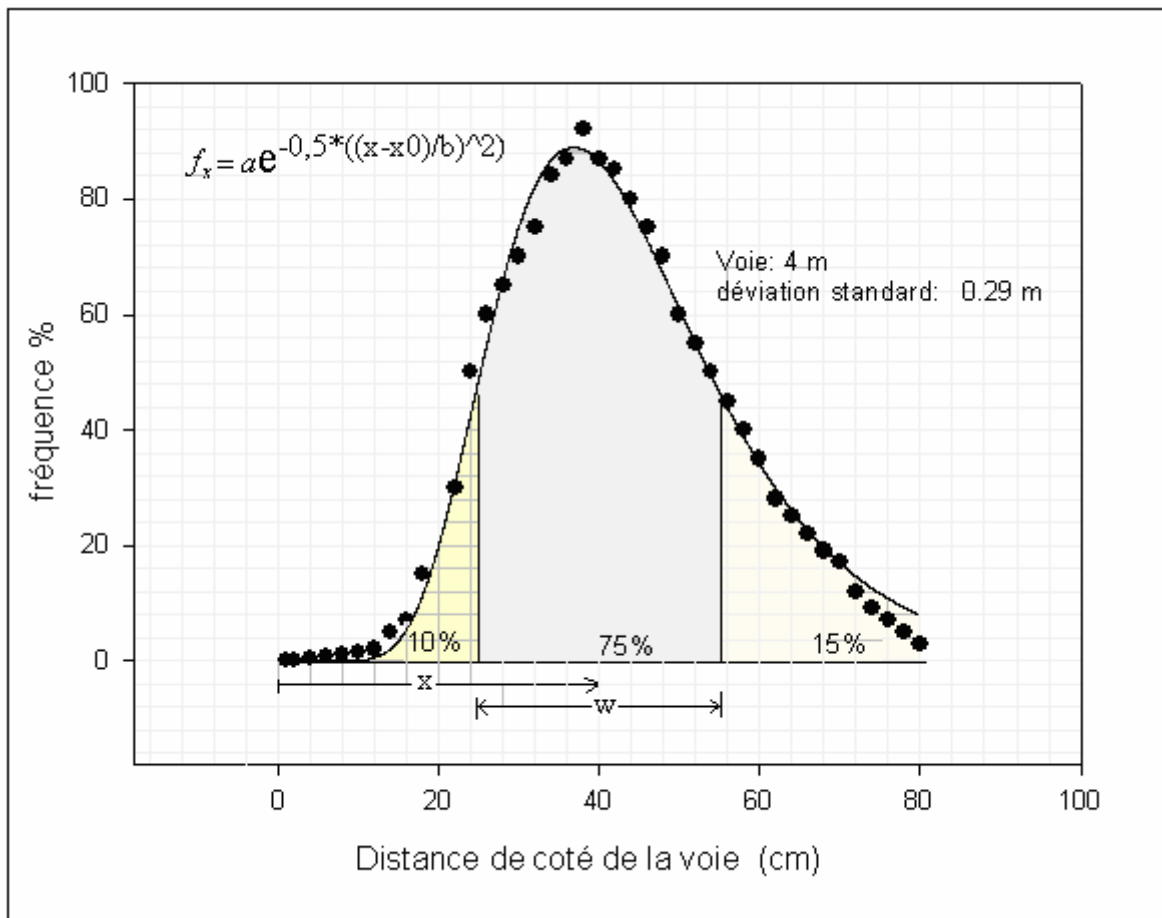


Figure 4.5a : Distribution de passages sur la chaussée

La figure 4.5b illustre l'influence du déplacement transversal sur le développement de l'orniérage. On constate que la prise en compte de ce déplacement réduit l'orniérage d'environ 31%. Ce résultat est conforme avec l'observation de White et al. (2002).

Les figures 4.5c et 4.5d illustrent l'influence du déplacement transversal sur la forme de l'orniérage pour les deux types de pneu. On constate que ce déplacement réduit le bourrelet de l'orniérage pour les deux types de pneus.

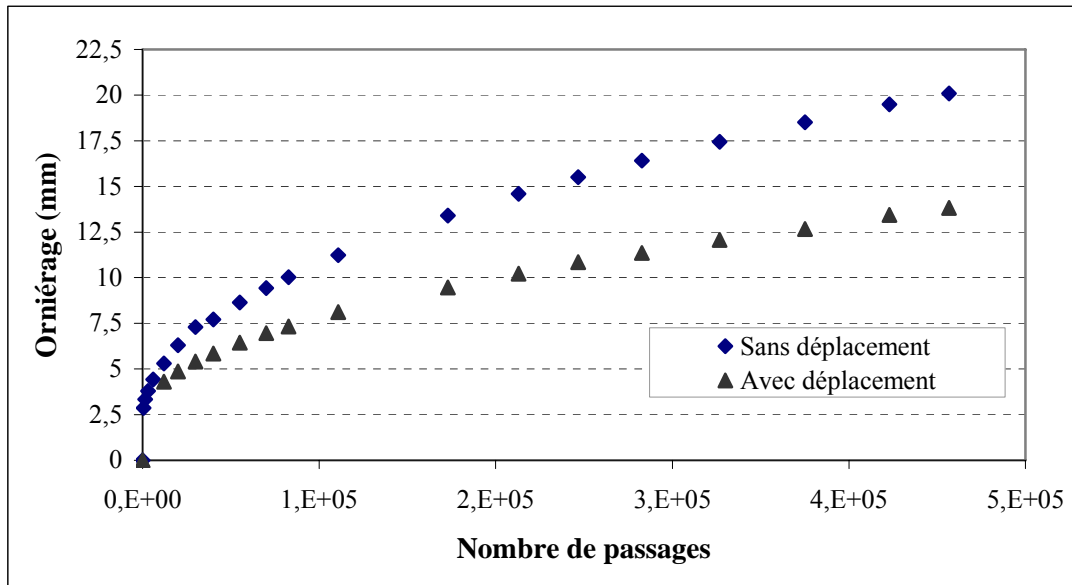


Figure 4.5b : Influence du déplacement transversal sur le développement de l'orniéage.

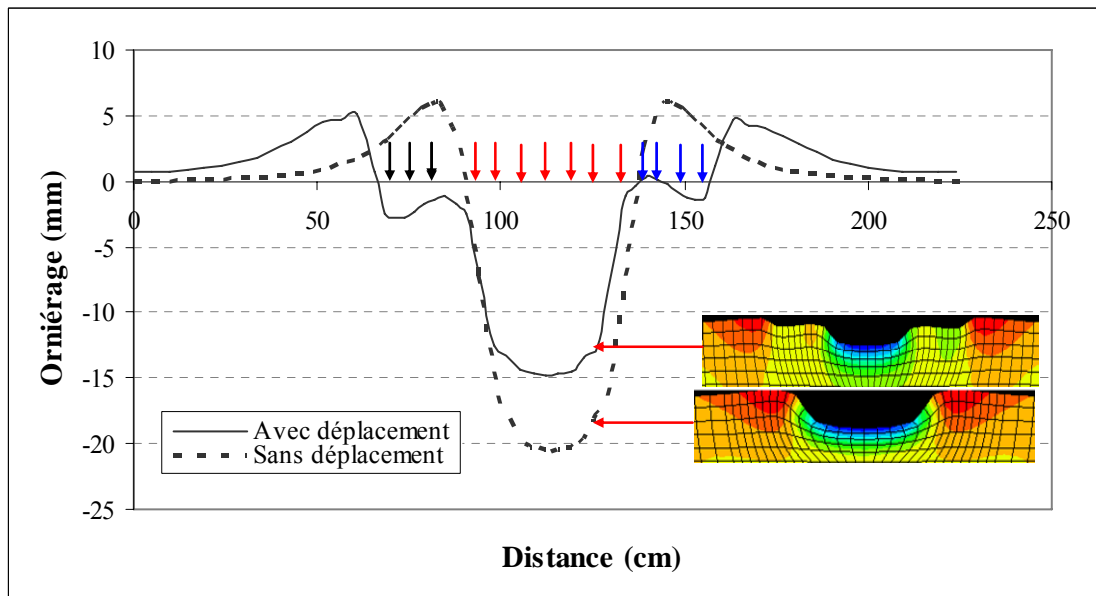


Figure 4.5c : Influence du déplacement transversal sur la forme de l'orniéage (pneu super single).

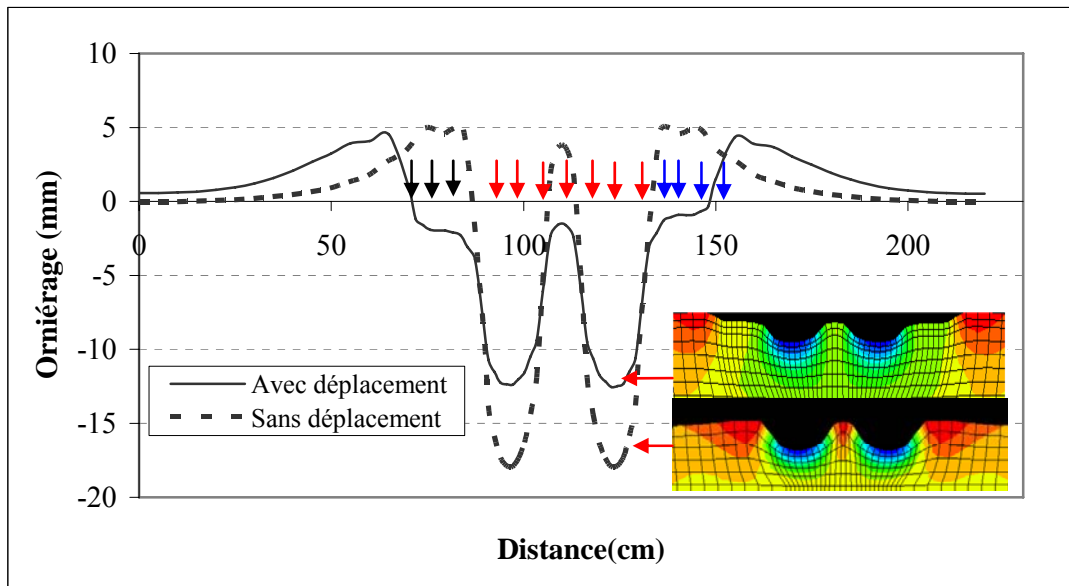


Figure 4.5d : Influence du déplacement transversal sur la forme de l'orniérage (pneu jumeau)

4.2.6 Influence de la vitesse de circulation

La diminution de la vitesse de circulation fait augmenter le temps de chargement et par conséquent induit une augmentation de l'orniérage (Brown. 1997, Kandhal 1998, Wang et al. 2004, Al-Qadi et al. 2002). La figure 4.6 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 décroît de 60 à 10km/h.

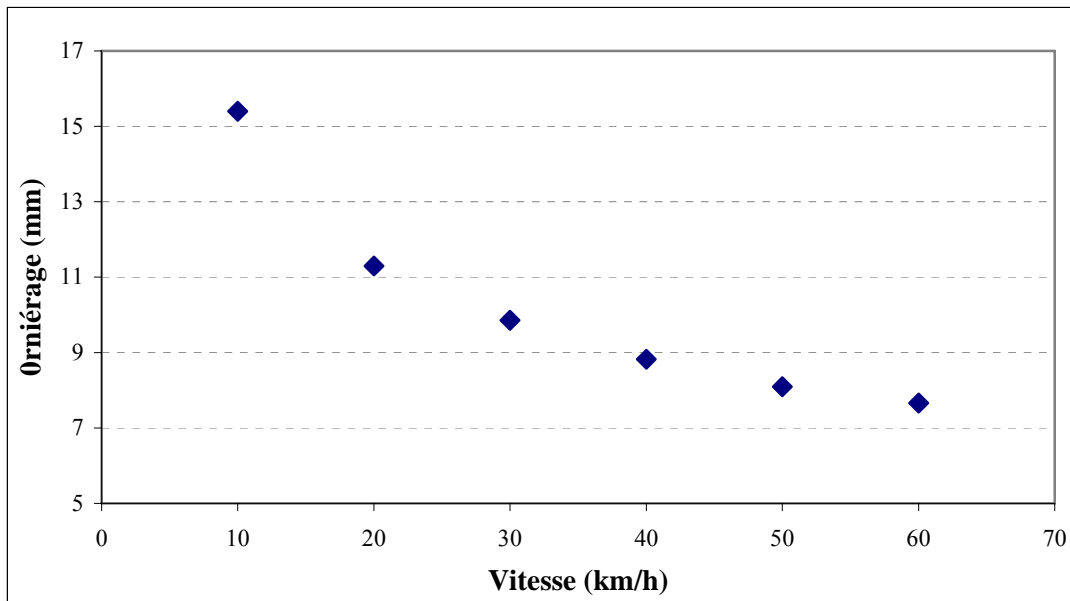


Figure 4.6 : Influence de la vitesse de circulation sur l'orniérage

4.3 Influence de la température

La figure 4.7a 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 croît avec l'augmentation de la température (figure 4.7b).

Afin d'expliquer cet effet, on donne dans les figures 4.7c et 4.7d l'influence de la température sur la déformation irréversible dans la couche de surface. On note qu'une augmentation de la température conduit à une augmentation importante de la déformation irréversible en particulier aux températures élevées.

Puisque les déformations dans les couches en enrobé bitumineux affectent celles dans les couches inférieures, la variation de la température affecte également le développement de la déformation plastique dans les couches inférieures comme on peut le constater dans les figures 4.7e et 4.7f. ce résultat est en accord avec les mesures réalisées par Perret et al. (2001, 2003) qui ont montré que l'augmentation de la température entre 30 et 50°C fait augmenter la déformation verticale de 18%.

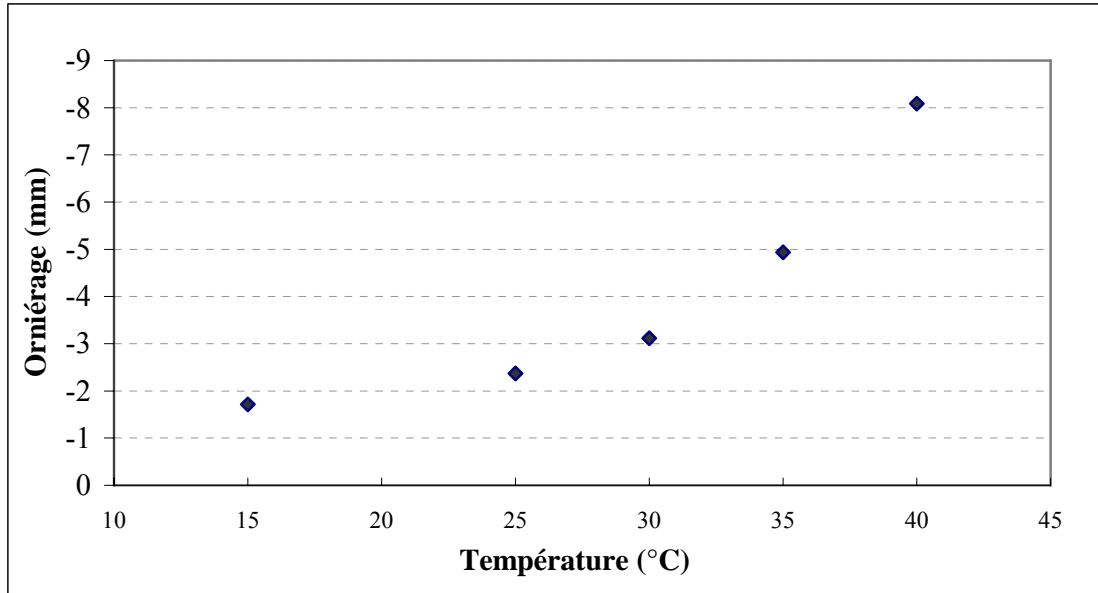


Figure 4.7a : Influence de la température sur le développement de l'orniérage

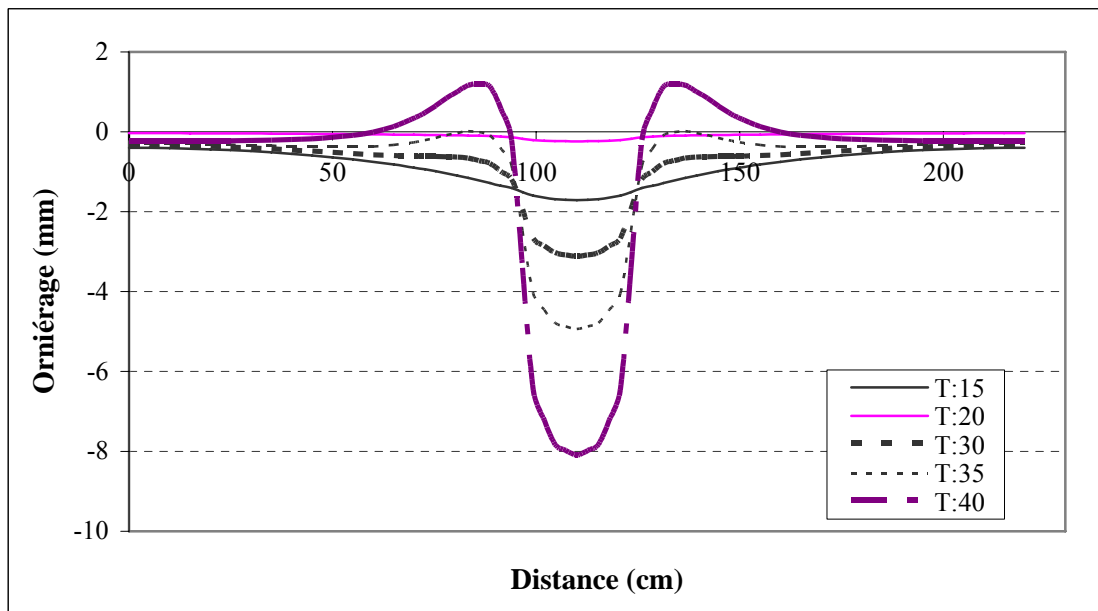


Figure 4.7b : Influence de la température sur la forme de l'orniérage

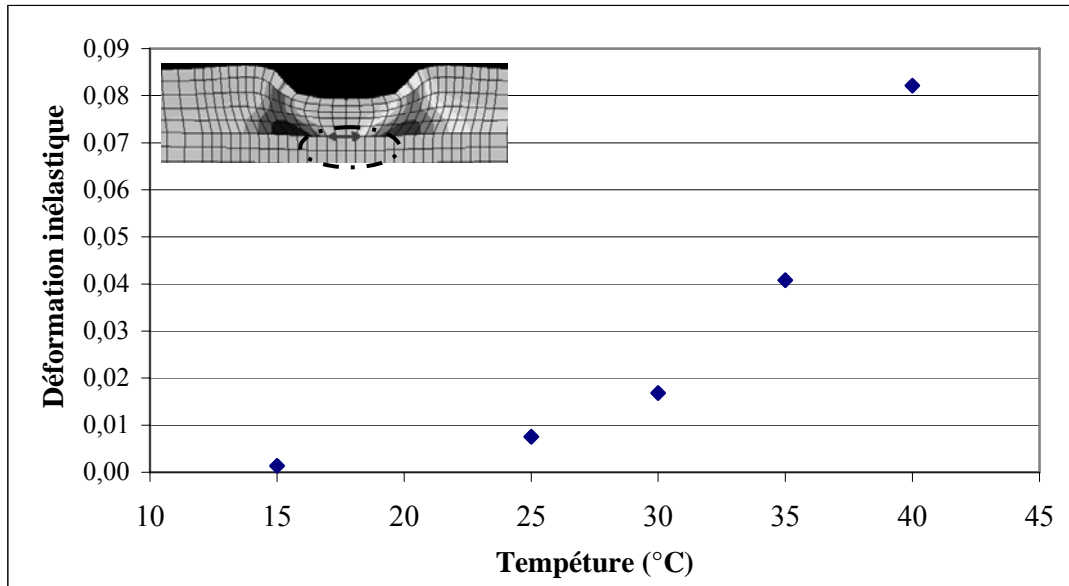


Figure 4.7c : Influence de la température sur la déformation irréversible en dessous de la couche de surface

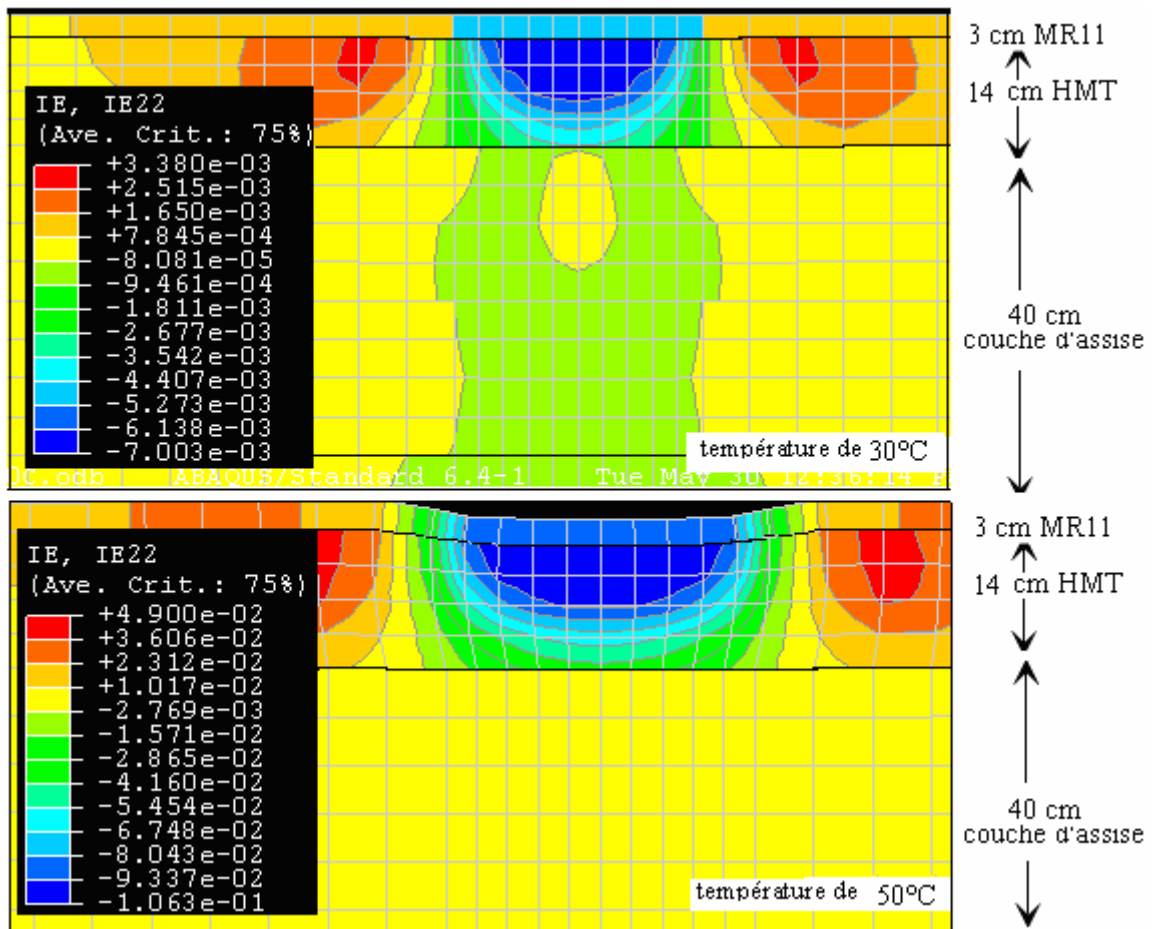


Figure 4.7d : influence de la température sur la distribution de la déformation irréversible dans la couche de surface

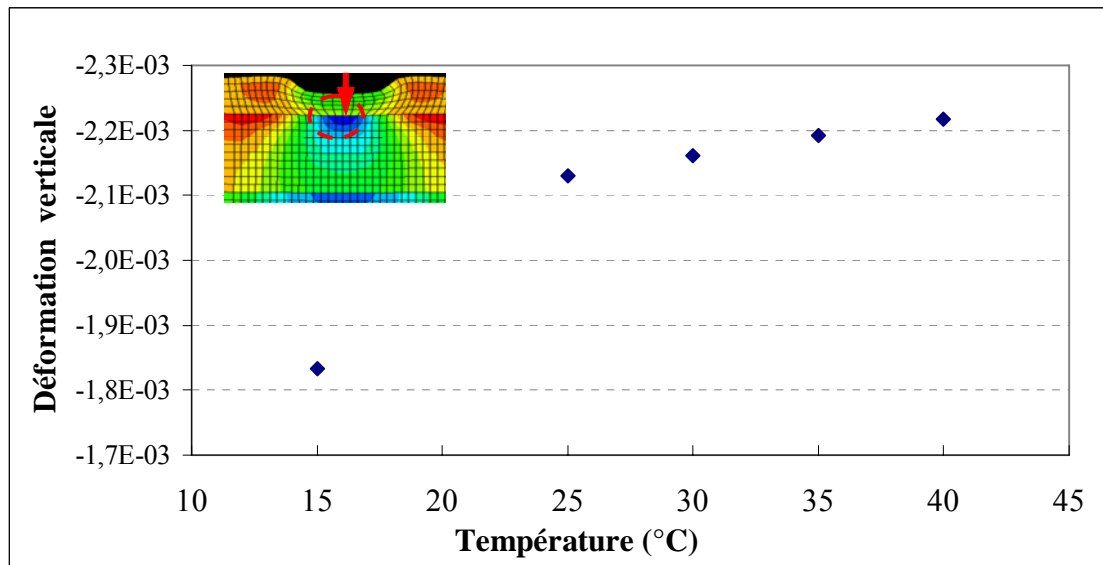


Figure 4.7e : Influence de la température sur le développement de la déformation verticale au sommet de la couche de support

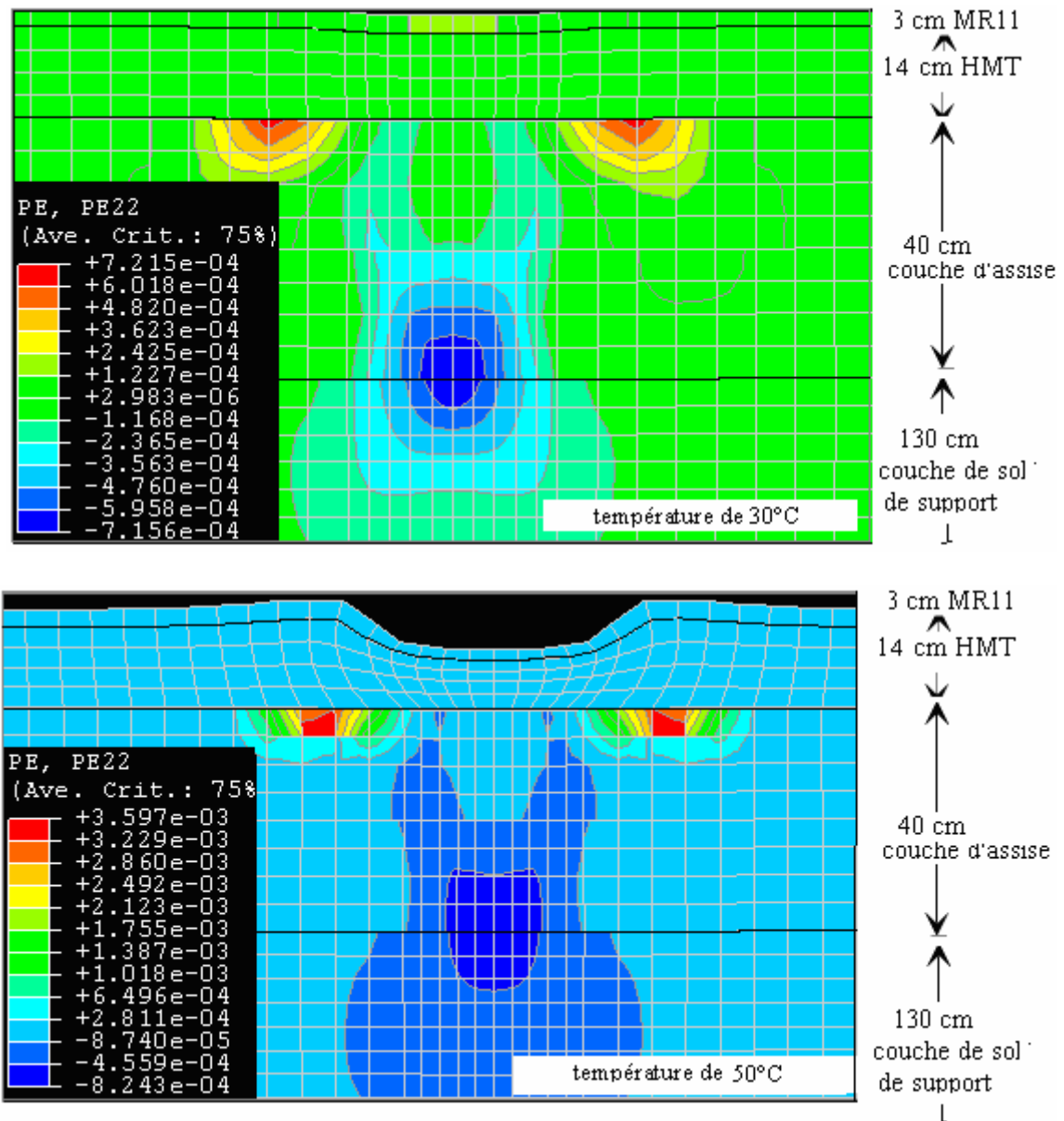


Figure 4.7f : Influence de la température sur la distribution de la déformation dans les couches inférieures

4.4 Caractéristiques des matériaux constitutifs

On analyse dans cette partie l'influence des propriétés des matériaux de la chaussée sur la formation et le développement de l'ornièrage. La performance des couches est influencée par leurs propriétés et par l'influence de la température et de l'humidité pour ces propriétés.

Le comportement de la couche en enrobé bitumineux, comme il est indiqué précédemment, dépend du module de déformation E et du paramètre A_T qui contrôle le comportement visqueux. Ces paramètres sont liés fortement à la température (figure 3.2, tableau 3.3, chapitre 3). La diminution de E et A_T accélère la formation de l'orniéage. Les figures 4.8a et 4.8b présentent l'influence de ces deux paramètres sur l'orniéage. On constate que l'orniéage augmente fortement avec l'augmentation du paramètre A_T : une augmentation d' A_T de 100% fait augmenter l'orniéage de 64%. On constate aussi que l'orniéage augmente avec la diminution de E : une réduction de E de 40% fait augmenter l'orniéage de 43%. On remarque également que l'enrobé bitumineux avec un module élevé présente une meilleure résistance à l'orniéage.

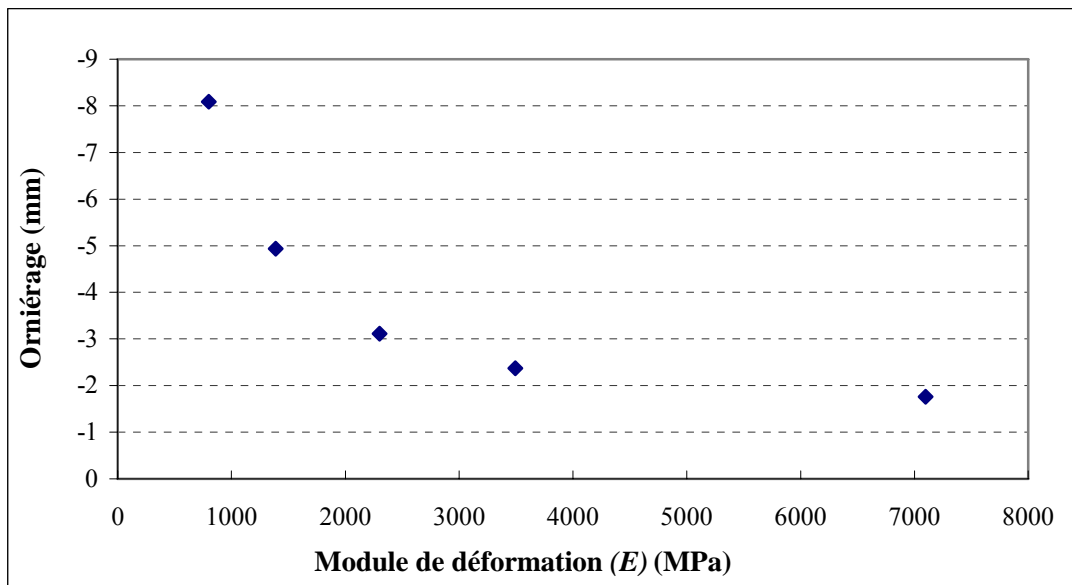


Figure 4.8a : Influence du module de déformation de la couche de surface sur l'orniéage

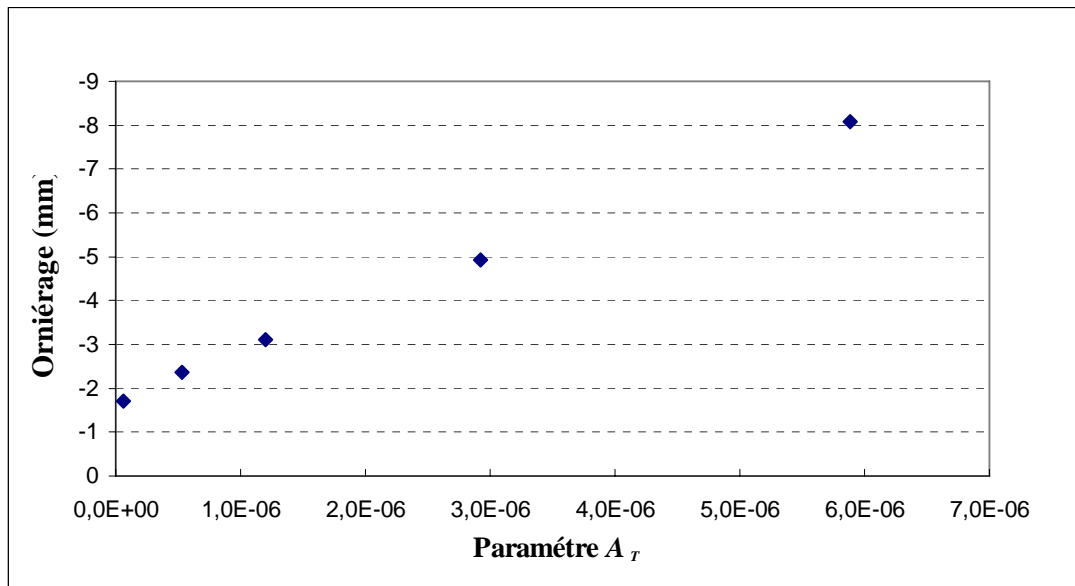


Figure 4.8b : Influence du paramètre A_7 de l'enrobé bitumineux sur l'orniérage

La teneur en eau influence le comportement des couches inférieures. Krarup (1994) a observé que le module de déformation des couches inférieures diminue de 35 à 40% avec la saturation. La figure 4.8c présente l'influence du module de déformation de la couche de sol et la couche de base sur le développement de l'orniérage. On constate que le module de déformation de la couche de sol affecte d'une manière importante l'orniérage. En effet, une réduction de 40% de ce module fait croître l'orniérage de 38%, alors que la même réduction du module de la couche de base ne fait augmenter l'orniérage que de 18%. Toutefois, la variation du module de déformation des couches inférieures n'affecte pas la forme de l'orniérage (figure 4.8d).

En comparant l'influence du module de déformation des couches sur la forme et la profondeur de l'orniérage, on constate que la couche de surface affecte l'orniérage d'une manière plus importante que les couches inférieures. La réduction du module de déformation E de 40% de la couche de surface fait augmenter l'orniérage de 43% alors que la même réduction du module de la couche de support fait augmenter l'orniérage de 38%. On note également que l'orniérage causée par la réduction des propriétés de la couche de surface est accompagné par un bourrelet à l'extérieur du chemin de passage du pneu contrairement à l'orniérage liée à la réduction du module de déformation (figure 4.8e). Ceci montre que la forme de l'orniérage constitue un bon indicateur pour déterminer l'origine de la déformation de la chaussée.

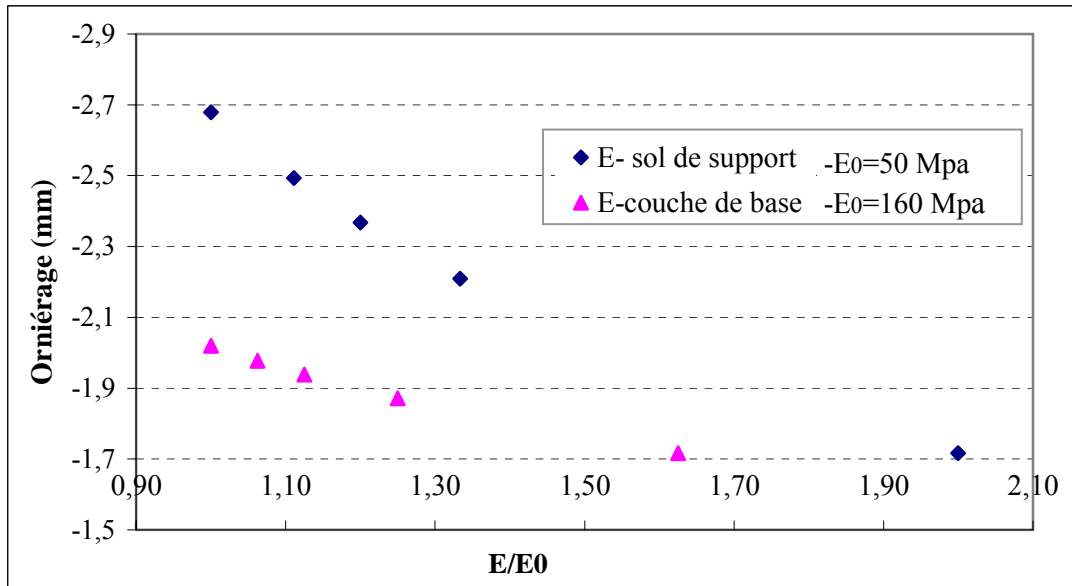


Figure 4.8c : Développement de l’orniérage en fonction du changement de E de la couche de base et du sol de support

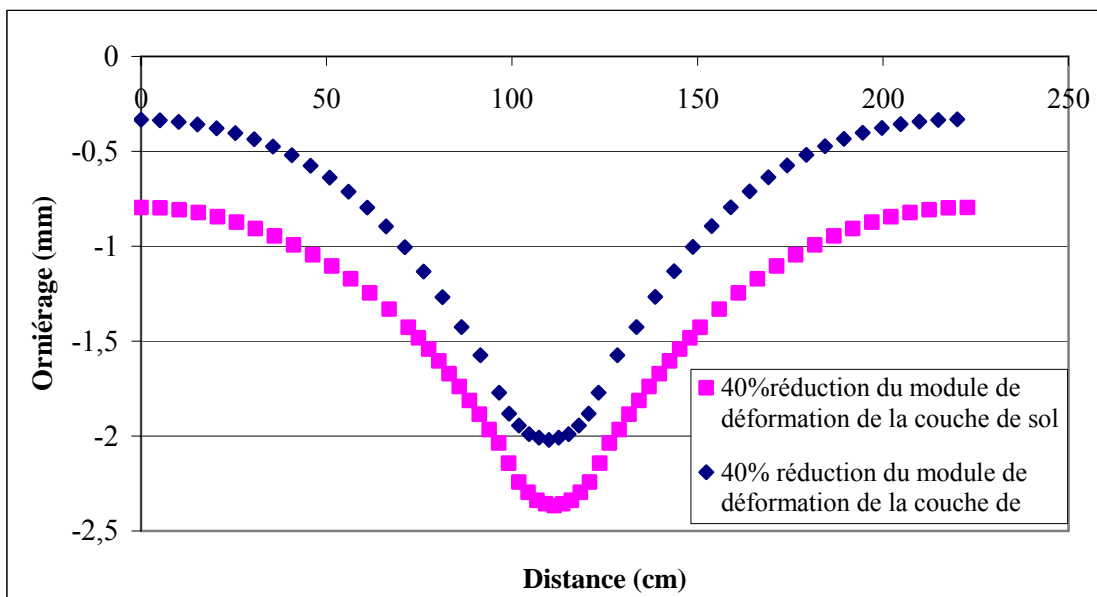


Figure 4.8d : Influence du module de déformation des différentes couches sur l’orniérage

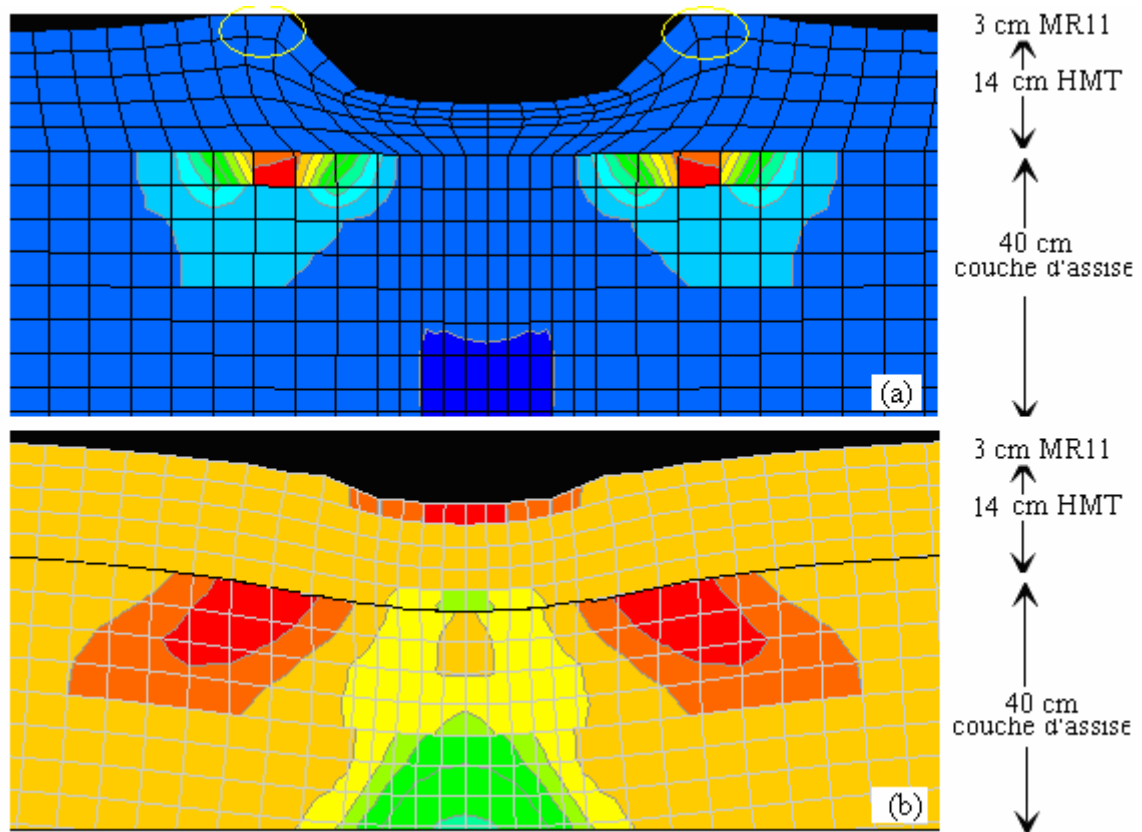


Figure 4.8e : Forme de l'orniérage causé de : (a) réduction des propriétés de la couche de surface et (b) réduction du module de déformation dans la couche de support

4.5 Applications à la prédiction de la durée de vie

Dans cette partie, on présente une application du modèle numérique pour la prédiction de la durée de vie d'une chaussée et pour analyser l'influence de différents paramètres (température, type de trafic, type de matériaux,...) sur l'orniérage.

4.5.1 Variations environnementales

Un calcul a été réalisé pour la prédiction de la durée de vie de la chaussée exprimée en nombre de passages d'essieux équivalents (EQ) (le nombre d'essieux équivalent est égal au trafic cumulé multiplié par un coefficient d'agressivité). On utilise la méthode française de dimensionnement de chaussée: un essieu simple à des pneus jumeaux exerçant une charge totale de 13 tonnes avec une pression de gonflage de 662 kPa (Tran 2004). Les figures 4.9a et 4.9b donnent le nombre de passages d'essieu équivalent nécessaire pour atteindre un orniérage de 8mm (profondeur nécessitant une intervention d'entretien) et la profondeur

critique de sécurité (12,5 mm). On constate que le nombre de passages équivalent est fortement influencé par la température. Pour atteindre une profondeur de 12.5 mm, la chaussée peut supporter 6 fois plus de passages à 30°C qu'à 35°C, 5 fois plus de passages à 35°C qu'à 40°C.

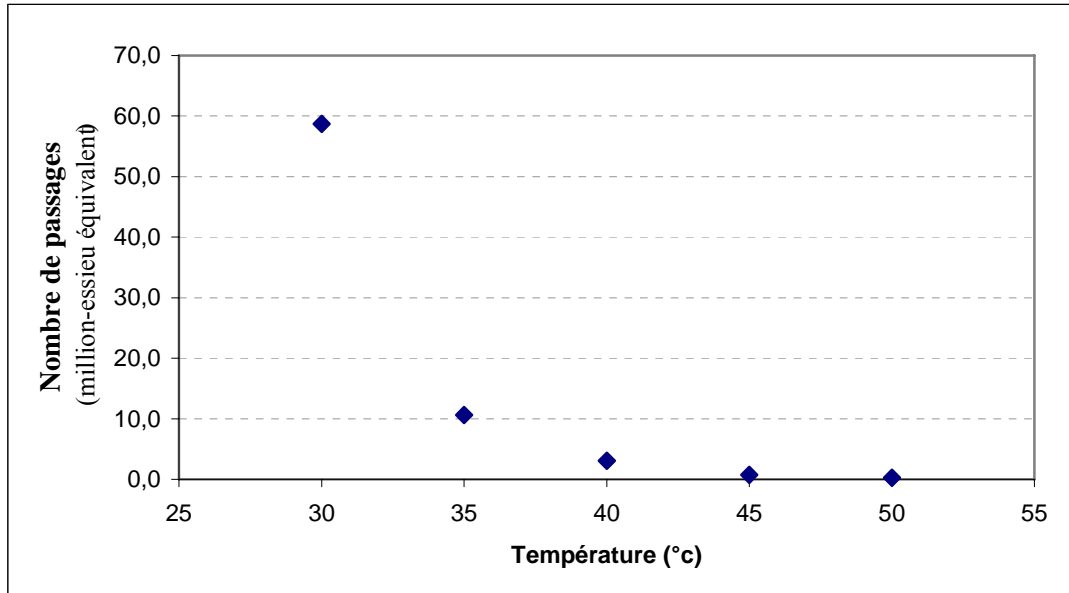


Figure 4.9a : Influence de la température sur le nombre de passages d'essieu équivalent causant un orniéage de 12,5 mm

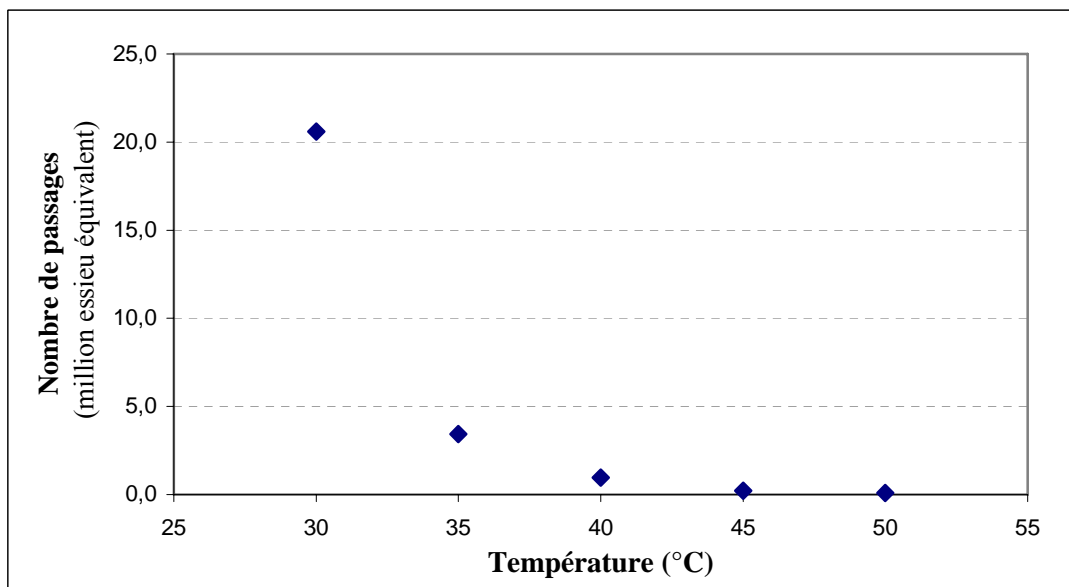


Figure 4.9b : Influence de la température sur le nombre de passages d'essieu équivalent causant un orniéage de 8 mm

4.5.2 Matériaux à module élevé (EME1)

Dans la partie bibliographique nous avons indiqué qu'EME1 améliore la résistance des chaussées à l'orniérage. L'utilisation de l'enrobé à module élevé (EME1 norme français NF P 98.140) est obtenu par le choix d'une formulation spécifique et par le recours à des bitumes durs élaborés spécialement pour cet usage.

On présente dans cette section une analyse de l'efficacité de l'enrobé EME1 contre l'orniérage. Les figures 4.10a, 410b donnent la section de la chaussée étudiée et la courbe granulométrique d'EME1. Les tableaux 4.1a et 4.1b présentent respectivement les paramètres de Marshal et les valeurs du module de déformation pour l'enrobé EME1 (Perret et al.2003).

Pour déterminer les paramètres du modèle (A_T, n, m) de l'enrobé bitumineux EME1, on a appliqué la démarche présentée dans le troisième chapitre (3.3.1). Ces paramètres ont été déterminés à partir des essais réalisés par Perret et al. (2001). Les valeurs trouvées pour ces paramètres sont données dans le tableau 4.1c (30°C). On a utilisé les mesures de la déformation longitudinale à 30°C avec une pression de gonflage de 700 kPa et une charge/essieu de 11,5 tonne pour déterminer A_T et n . La détermination du paramètre m a été réalisée en utilisant les résultats d'un essai de résistance à l'orniérage (Perret et al. (2001). Les tableaux 4.1d et 4.1e donnent respectivement les résultats des mesures et de modélisation pour la déformation longitudinale et le taux d'orniérage (à 30000 cycles, 60°C (%))

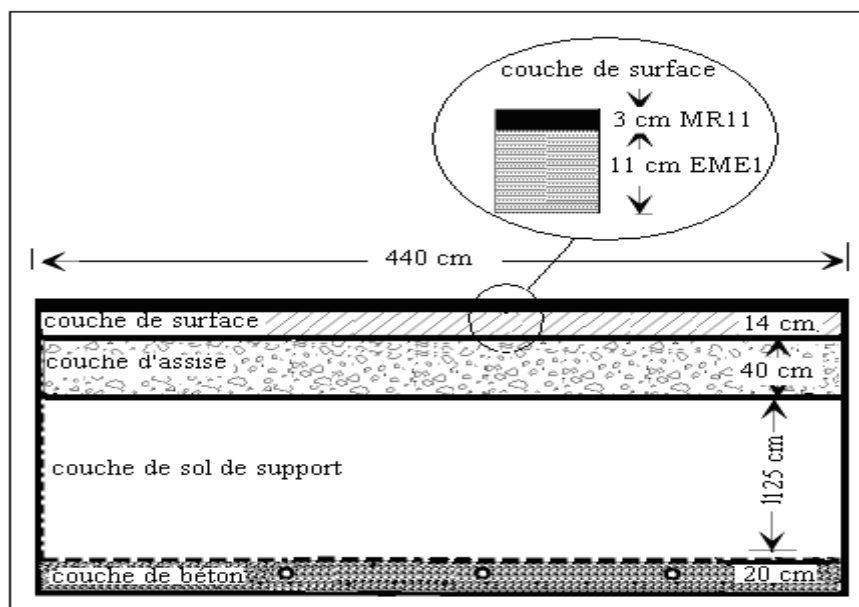


Figure 4.10a : Section de la chaussée avec la couche de l'enrobé à module élevé (EME1)

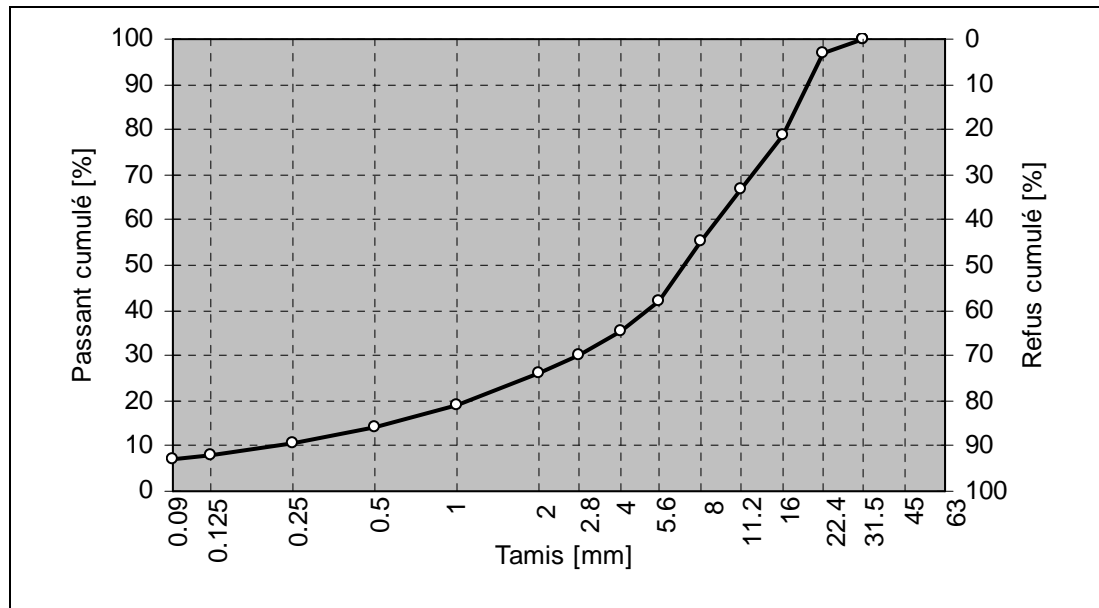


Figure 4.10b : Analyse granulométrique de l'enrobé à module élevé (EME1) (Perret et al.2003).

Tableau 4.1a : Caractéristiques d'enrobés bitumineux EME1 utilisé dans la section de la chaussées (Perret et al.2003)

| | |
|---|------|
| Masse volumique apparente (g/cm^3) | 2,39 |
| Teneur en vides HM (%) | 6,3 |
| Teneur en vides comblés HR (%) | 61 |
| Stabilité SM (kN) | 17,2 |
| Fluage FM (mm) | 2,3 |
| SM/FM (KN/mm) | 7,5 |
| Teneur en liant sur granulats (%) | 4,25 |

Tableau 4.1b : Valeur du module d'élasticité mesuré en fonction de la température et la fréquence de l'enrobé à module élevé (EME1) (Perret et al. 2003)

| Fréquence [Hz] | Température [°C] | Module E* [MPa] | Température [°C] | Module E* [MPa] |
|----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 8 | -10 | 23865 | 20 | 10772 |
| 15 | | 24707 | | 11852 |
| 25 | | 25258 | | 12544 |
| 33 | | 25843 | | 13063 |
| 50 | | 26671 | | 13900 |
| 8 | -5 | 22494 | 25 | 8487 |
| 15 | | 23264 | | 9300 |
| 25 | | 23892 | | 10227 |
| 33 | | 24097 | | 10519 |
| 50 | | 24848 | | 11994 |
| 8 | 0 | 20692 | 30 | 6361 |
| 15 | | 21723 | | 7262 |
| 25 | | 22427 | | 7917 |
| 33 | | 22548 | | 8310 |
| 50 | | 23982 | | 9436 |
| 8 | 5 | 18598 | 35 | 4353 |
| 15 | | 19647 | | 5049 |
| 25 | | 20346 | | 5798 |
| 33 | | 20542 | | 6230 |
| 50 | | 21515 | | 7456 |
| 8 | 10 | 16449 | 40 | 2885 |
| 15 | | 17299 | | 3533 |
| 25 | | 17884 | | 4088 |
| 33 | | 18428 | | 4487 |
| 50 | | 18847 | | 5276 |
| 8 | 15 | 13108 | 45 | 1804 |
| 15 | | 17159 | | 2233 |
| 25 | | 17971 | | 2734 |
| 33 | | 15350 | | 3004 |
| 50 | | 16440 | | 3728 |

Tableau 4.1c : Valeurs des paramètres du modèle pour l'enrobé bitumineux EME1 déterminées à 50°C.

| A_T | n | m |
|-------|------|------|
| 1,E-6 | 0,86 | 0,53 |

Tableau 4.1d : Déformation longitudinale en dessous de la couche de la surface.

| Température (° C) | Déformation (1 ^E -6) | |
|-------------------|---------------------------------|--------------|
| | Mesures (Perret et al. 2001) | Modélisation |
| 30 | 186 | 180 |
| 15 | 125 | 108 |
| 5 | 93 | 79 |

Tableau 4.1e : Taux d’orniérage avec la modélisation et l’essai de résistance (Nf P 98-253.1)

| Essai à l’orniérage au LAVOC | Résultats du calcul |
|------------------------------|---------------------|
| 1,8 | 1,83 |

La figure 4.10c présente une comparaison du développement de l’orniérage avec les deux types d’enrobés : enrobé bitumineux traditionnel (HMT22s) et l’enrobé à module élevé (EME1) (température = 50°C, pression de gonflage = 800 kPa). On constate que l’utilisation de l’enrobé bitumineux à module élevé (EME1) réduit l’orniérage de 38%, le résultat obtenu est en accord avec les mesures réalisées par Perret et al.(2002) qui ont montré que l’utilisation de l’enrobé EME1 réduit l’orniérage de 40% pour les conditions retenues dans nos calculs. On constate également que le nombre de passages causant un orniérage de 8mm (nécessitant une intervention d’entretien) pour une chaussée en EME1 est de 130% plus élevé que celui pour une chaussée en HMT22s.

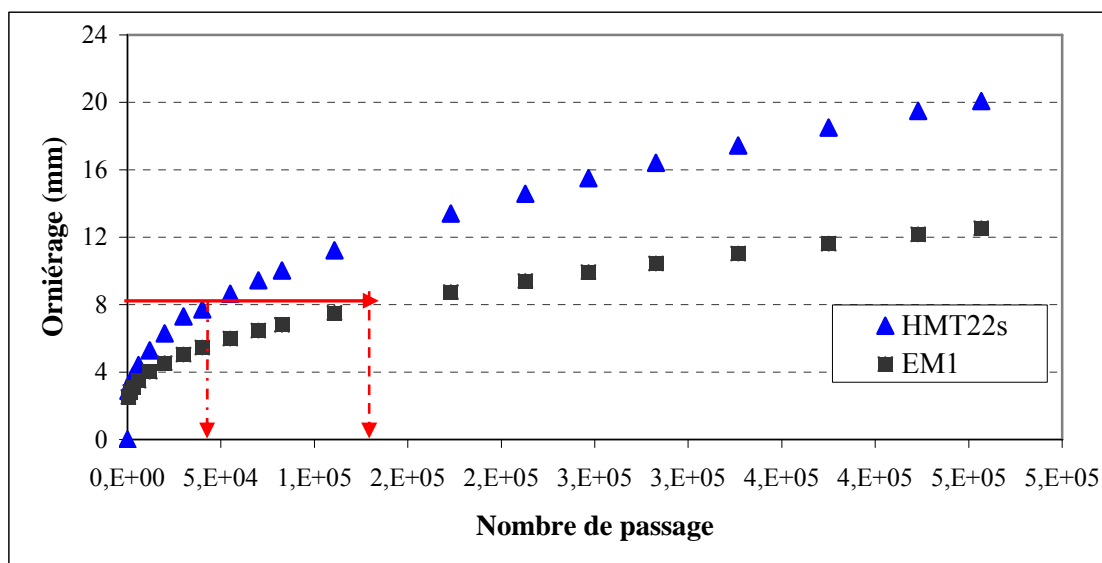


Figure 4.10c : Influence du type de béton bitumineux sur l’orniérage (température = 50°C, pression de gonflage = 800 kPa et charge/essieu 11,5 tonnes).

4.5.3 Application en milieu urbain

On propose dans cette section d'appliquer le modèle numérique à l'étude de l'orniérage en milieu urbain. Le développement de l'orniérage dans ce milieu présente des spécificités (en comparaison avec les voies rapides) qui sont liées aux faibles vitesses de circulation (vitesse moyenne de 50km/h) et à la concentration de passages de véhicules à cause de la limitation du déplacement transversal.

Une analyse a été réalisée pour prédire l'orniérage dans deux cas du trafic : le premier correspond à une voie rapide avec une vitesse de circulation de 90 km/h et un déplacement transversal de 0,4 m ; le deuxième concerne une chaussée en milieu urbain avec une vitesse de 50 km/h et sans déplacement transversal ou avec un déplacement transversal de 0,2 m. L'analyse a été effectuée sur la chaussée étudiée dans le troisième chapitre (3.3.1 et 3.3.2). La température de la chaussée est de 45°C (Température ambiante est de 28°C, Yavuzturk et al.2005). La figure 4.11a présente le développement de l'orniérage en milieu urbain et sur voie rapide. On constate que l'orniérage se développe d'une manière plus importante en milieu urbain : le nombre de passages causant un orniérage de 8mm sur voie rapide est 4 fois plus élevé que celui en milieu urbain. On constate que l'orniérage en milieu urbain diminue avec l'augmentation du déplacement transversal : il diminue de 22% avec un déplacement transversal de 20 cm. On constate également que la forme de l'orniérage en milieu urbain est différente de celle obtenue en voie rapide (figure 4.11a).

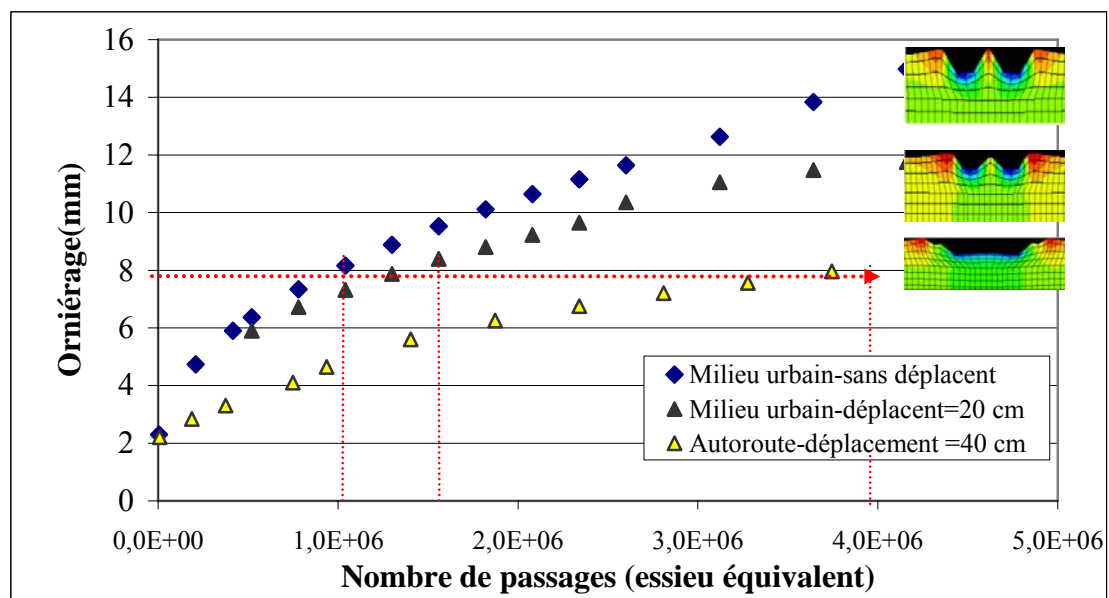


Figure 4.11a : Développement de l'orniérage dans la chaussée en milieu urbain en fonction du nombre de passage

Utilisation d'enrobé à module élevé en milieu urbain

Une analyse a été réalisée pour déterminer l'influence de l'utilisation du béton bitumineux EME1 en milieu urbain sur l'orniérage. L'analyse a été effectuée pour différentes températures et pour un nombre de passages de 0,8 million d'essieu équivalent (duré de vie pour trafic TC4 - selon la norme française). La figure 4.11b présente les résultats obtenus en comparaison avec le béton traditionnel. On constate que l'enrobé EME1 présente une bonne résistance à l'orniérage notamment aux températures élevées.

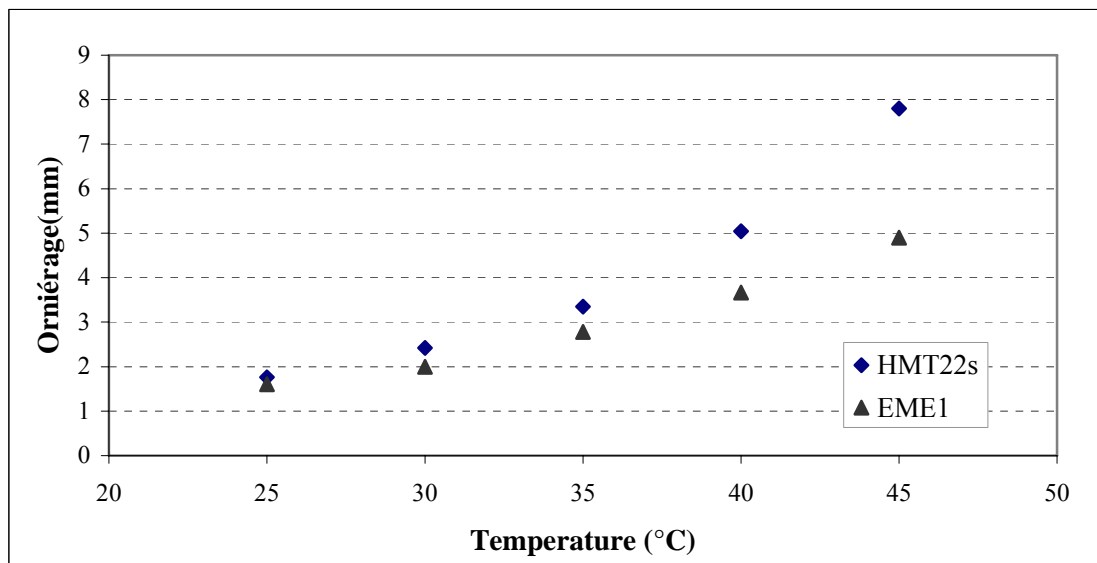


Figure 4.11b : Influence des matériaux utilisés dans les chaussées en milieu urbain sur l'orniérage

4.6 Réparation des chaussées dégradées

La modélisation réalisée dans ce travail a permis d'avoir une bonne compréhension de l'orniérage. Cette modélisation est utilisée dans cette section pour analyser des procédés et des stratégies de réparation de l'orniérage.

La structure utilisée dans l'analyse est présentée dans la figure 4.12a. Il s'agit d'une couche de surface (HMT22S) de 14 mm d'épaisseur, deux couches de base de graves de 40 cm d'épaisseur, une couche de sol de support de 130 cm d'épaisseur et une couche de béton, les propriétés des matériaux sont celles utilisées dans le troisième chapitre (3.3.1 et 3.3.2).

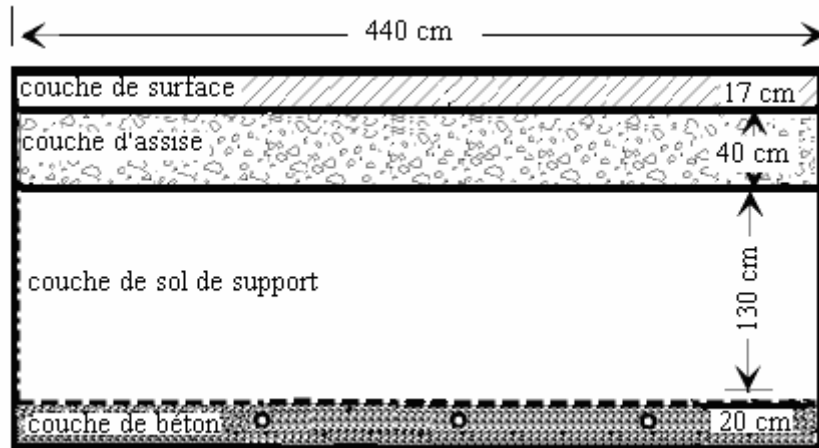


Figure 4.12a : Section utilisée dans l'analyse des procédés d'entretien.

4.6.1 Influence du matériau utilisé pour l'entretien

Lorsque l'orniérage atteint une valeur critique nécessitant l'intervention d'un entretien, la couche dégradée peut être remplacée soit par une couche de même matériau soit par un autre matériau. Une analyse a été réalisée avec les deux types d'enrobé bitumineux (EME1 et HMT22s). La figure 4.12b présente les performances obtenues avec ces enrobés. On constate que l'entretien avec le béton à module de déformation élevé EME1 fait augmenter la durée de vie de la chaussée de 30% par rapport à un entretien avec l'enrobé HMT22s.

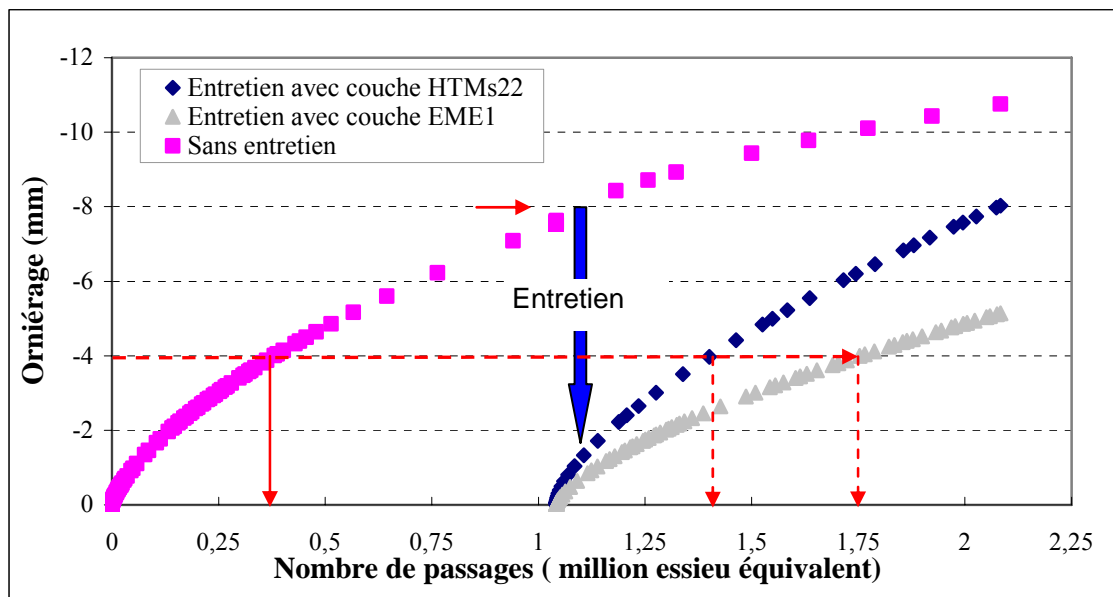


Figure 4.12b : Influence de l'entretien sur la durée de vie (exprimée par le nombre de passages équivalent) en utilisant deux types d'enrobé

4.6.2 Influence de l'épaisseur de la couche de réparation

Une analyse a été effectuée pour étudier l'influence de l'épaisseur de la couche de réparation.

La figure 4.13a présente l'influence de l'épaisseur de la couche de réparation sur le comportement de la chaussée à l'orniérage. On constate que l'épaisseur de la couche de réparation affecte le comportement de la chaussée à l'orniérage mais que l'utilisation du béton bitumineux à haut module même en faible épaisseur (7 cm) donne des meilleures performances que la réparation par le béton traditionnel.

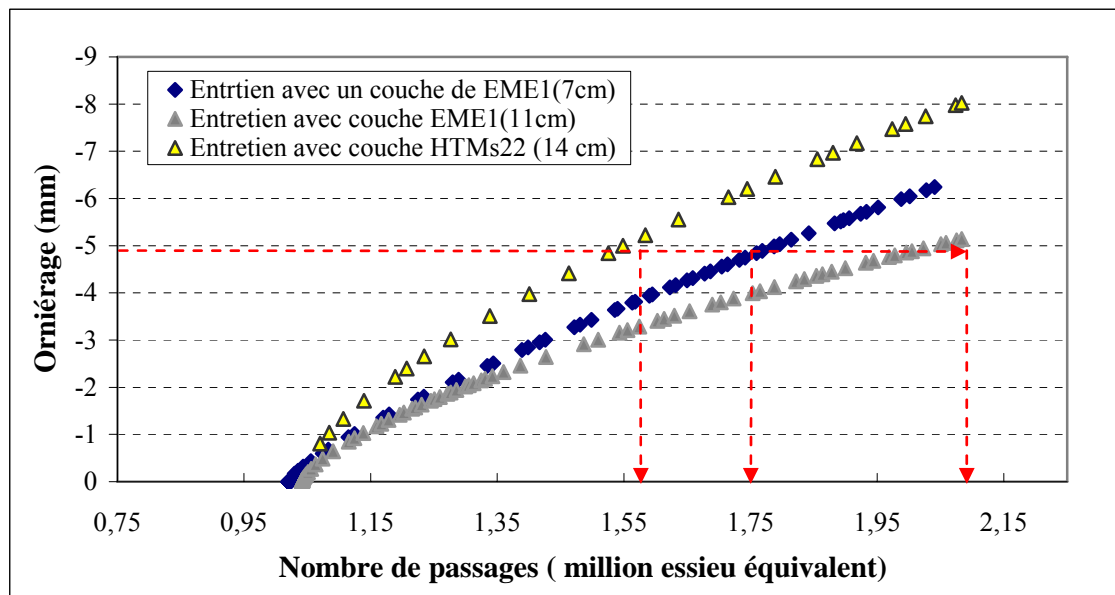


Figure 4.13a : Influence de l'épaisseur de la couche de remplacement sur le développement de l'orniérage

Habituellement, l'entretien des chaussées est réalisé en remplaçant la couche de la surface par une nouvelle couche. Si l'orniérage affecte les couches inférieures, il convient d'envisager une intervention dans ces couches.

La figure 4.13b présente l'effet du mode d'entretien sur une chaussée. On constate que la réparation des couches de surface et de base donne des meilleures performances en comparaison avec une réparation de la couche de surface.

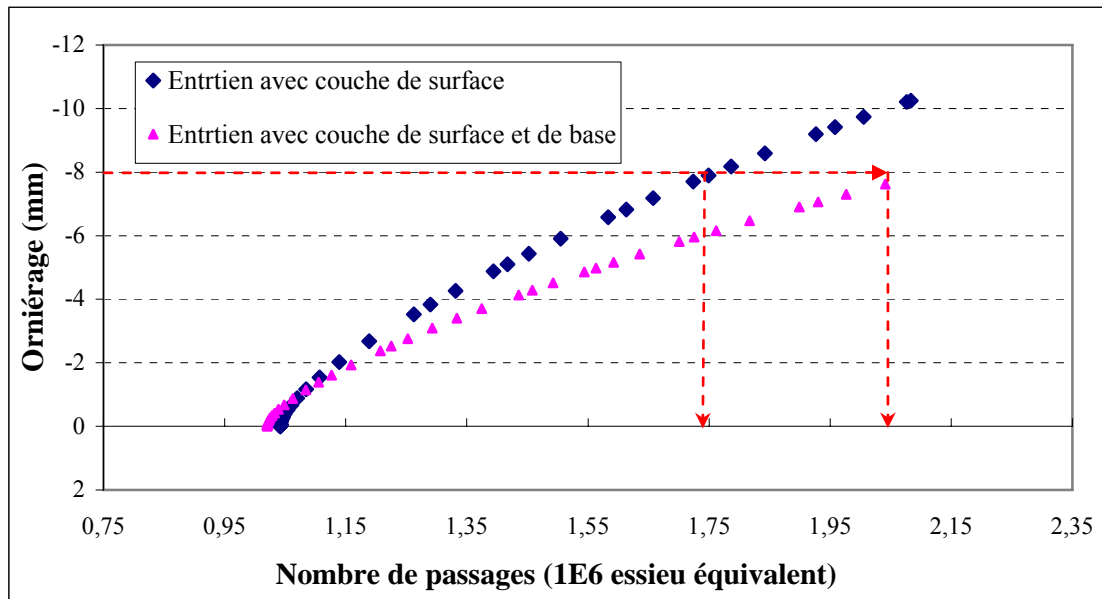


Figure 4.13b : Influence du type de l'entretien (les couches remplacées) sur le développement de l'orniéage

4.7 Conclusion

Ce chapitre a comporté une analyse de l'influence de principaux facteurs sur la formation et la propagation de l'orniérage.

Les résultats obtenus montrent que l'orniérage est plus sensible à l'augmentation de la charge/essieu qu'à la pression de gonflage. L'orniérage décroît d'une manière significative avec le déplacement transversal. Par conséquent, l'incorporation du déplacement transversal dans le modèle de prévision de l'orniérage permet une optimisation de la conception des chaussées. On constate également que le pneu super single produit plus d'orniérage que le pneu jumeau. La température joue un rôle clé sur le développement de l'orniérage, l'élévation de la température accélère la formation de l'orniérage. L'analyse montre que l'orniérage causé par la dégradation dans les couches inférieures est moins important que celui causé par la couche de surface. L'orniérage causé par la dégradation dans la couche de surface est accompagné par un bourrelet, qui est moins prononcé lors d'une dégradation dans les couches inférieures.

La modélisation proposée dans le cadre de cette étude permet d'avoir une prévision du développement de l'orniérage avec différentes conditions du trafic (milieu urbain) et d'environnement (température). Les résultats montrent que l'orniérage se développe d'une manière plus importante en milieu urbain en comparaison aux voies rapides. On note que l'enrobé à module élevé résiste bien à l'orniérage, notamment à des températures élevées.

La modélisation réalisée dans ce travail a permis d'analyser des procédés et des stratégies de réparation de l'orniérage. Les résultats montrent que l'entretien avec un béton à module de déformation élevé (EME1) fait augmenter la durée de vie de la chaussée de 30% par rapport à un entretien avec l'enrobé HMT22s.

Conclusion générale

Ce travail a porté sur une étude numérique de l'orniéage des chaussées. Il a comporté 3 parties.

La première partie a concerné le développement d'un modèle numérique non linéaire pour les chaussées. Dans ce modèle, le comportement des couches inférieures est décrit à l'aide d'un modèle élastoplastique utilisant le critère de Mohr-Coloumb. Un modèle elasto-viscoplastique est utilisé pour décrire le comportement des couches de surface. L'influence de la température est prise en compte en utilisant le principe de superposition temps-température. Une étude a été réalisée pour la modélisation du chargement. Cette étude a montré que le chargement du pneu super single peut être modélisé en utilisant la simplification la surface totale (bandes de roulement et vide) alors que la surface de contact proposée par Hung est bien adaptée pour les pneus jumeaux.

Le modèle numérique a été vérifié sur des essais en vraie grandeur comportant à la fois des mesures instantanées et des mesures à long terme (orniéage) pour différentes conditions du chargement et de température. Les tests ont montré que le modèle reproduit d'une manière satisfaisante le comportement de la chaussée à court et à long terme.

La 2^{ème} partie a comporté une étude numérique de l'orniéage et l'analyse de l'influence de principaux facteurs sur l'initiation et le développement de l'orniéage. Cette étude a montré que l'orniéage est très sensible à l'augmentation de la charge/essieu. Il augmente d'une manière sensible avec la température. L'orniéage dépend également du type de pneu. Le risque d'orniéage avec le pneu super single est plus élevé que celui avec le pneu jumeau. Le déplacement transversal assure une meilleure répartition du chargement sur les chaussées, ceci se traduit par une réduction du risque d'orniéage. L'incorporation du déplacement transversal dans les modèles de prévision de l'orniéage permet d'améliorer et d'optimiser la conception des chaussées.

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, qui est moins prononcé que celui résultant d'une dégradation des couches inférieures.

La 3^{ème} partie a comporté une application du modèle à la prévision de l'orniérage des voiries urbaines et la réparation des chaussées endommagées par l'orniérage.

Les analyses effectuées montrent que les voiries urbaines sont très vulnérables à l'orniérage, à cause de la faible vitesse de circulation en milieu urbain et la réduction du déplacement latéral. L'utilisation de l'enrobé à module élevé permet de réduire l'orniérage, par conséquent cet enrobé est recommandé pour les voiries urbaines.

L'étude des stratégies de réparation des chaussées a montré que l'enrobé à module de déformation élevé présente des avantages pour la réparation de l'orniérage, car il assure une augmentation de la durée de vie des chaussées.

Le modèle présenté dans ce travail présente de nombreux avantages. Il a été validé sur des essais en vraie grandeur réalisés en laboratoire. Il faudra dans l'avenir le valider sur des mesures réalisées sur des chaussées réelles. La prise en compte de la température constitue un aspect important. Il faudra poursuivre le travail sur cet aspect, notamment par la réalisation des essais et la validation du modèle sur ces essais. Il serait également intéressant de travailler avec les bureaux d'ingénierie et les entreprises pour l'application de ce modèle dans des projets réels et enrichir ce modèle par le retour d'expérience.

Références

1. AASHTO, 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington.
2. Al-Qadi, L., Elseifi, M. and Yoo, P., 2004. *Characterization of Pavement Damage Due to Different Tire Configurations*. Journal of APPT, Vol. 84. 2004, pp. 427-466.
3. ALI, B., SADEK, M., SHAHROUR, I and SULTAN, B., 2005. *An Ecological Method to Improve the Short-Term Aging Resistance of Asphalt Using Crumb Rubber*. International Conference Urban Engineering – 12-13.October 2005, Lille
4. Archilla. R., and Madanat S., *Development of a Pavement Rutting Model from Experimental Data*, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Volume 126, 2000 No.4 pp.291-299.
5. Archilla, A. Madanat, S. 2001. *Economic Model of Pavement Rutting in Asphalt Concrete Mixes*. Transportation Research Record, TRB, 2001 No. 453. Transportation Centre University of California at Berkeley, CA 94720
6. Bahuguna, S., Panoskaltsis, V. and Papoulia, C. 2006. *Identification and Modelling of Permanent Deformations of Asphalt Concrete* J. Engrg. Mech., Volume 132 (March 2006), Issue 3, pp. 231-239
7. Bahuguna, P., Panoskaltsis and Papoulia, M. 2000. *Characterization and Modelling of Permanent Deformations of Asphalt Pavements*. Proceedings, ASCE 14th Engineering Mechanics Conference, University of Texas, Austin, TX, May 21-24, 2000.
8. Bonaquist, R., Surdahl, R., Mogawer, W. 1889. *Effect of Tire Pressure on Flexible Pavement Response And Performance* Transportation Research Record (TRB) Issue Number: 1227, ISSN: 0361-1981
9. Blab, R., Harvey, J. 2002. *Modeling Measured 3D Tire Contact Stresses in a Viscoelastic FE Pavement Model*. Journal of Engineering Mechanics Volume 2, Issue 3, pp. 271-290.
10. Blab, R. 1999. *Introducing Improved Loading Assumptions into Analytical Pavement Models Based on Measured Contact Stresses of Tire*. Paper Number: CS5-3 Submitted to the International Conference on Accelerated Pavement Testing
11. Bonaquist, R. 1992. *An Assessment of the Increased Damage Potential of Wide Based Single Tires*. Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 3, pp. 1-16.

12. Brown, F. 1978. *Material Characteristics for Analytical Pavement Design*. Developments in Highway Pavement Engineering, Chapter II. P.S. P. Applied Science Publishers.
13. Brown, S. 1997. **Achievements And Challenges In Asphalt Pavement Engineering** ISAP - 8th International Conference on Asphalt Pavements –August 1997, Seattle.
14. Cebon, D. 1993 *Interaction Between Heavy Vehicles and Roads*. Technical report, Cambridge University Engineering Department, Cambridge, UK
15. Cela, J. 2002. *Material identification procedure for elastoplastic Drucker-Prager Model*. Journal of Engineering Mechanics, Journal of Engineering Mechanics / ASCE, 128 (5), pp. 586-591.
16. Chehab, G., Kim, Y., Schapery, R., Witzack, M., Bonaquist, R. 2003. *Characterization of Asphalt Concrete in Uniaxial Tension Using a Viscoelastoplastic Model* Journal of Asphalt Paving Technology, AAPT, Vol. 72.
17. Chehab, G. 2002. *Characterization of Asphalt Concrete in Tension Using a Viscoelastoplastic Model*. Ph.D. Dissertation, North Carolina State University
18. Chehab, G. and Kim, R., 2005. *Viscoelastoplastic Continuum Damage Model Application to Thermal Cracking of Asphalt Concrete*. Concrete Journal of Materials in Civil Engineering Volume 17 (July/August 2005), Issue 4, pp. 384-392
19. Chen, J-S., Lin, C-H., Stein, E. and Hothan, J. 2004. *Development of a Mechanistic-Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements*. Journal of Computing in Civil Engineering Volume 130(July/August 2004), Issue 4, pp. 519-525
20. Chen, D-H., Wang, W., Kenis, B., Nazarian, S. and Scullion, T., 2004. *Rutting Prediction Using Calibrated Model with TxMLS and AASHO Road Data International Conference Accelerated Pavement* September 26-29, 2004 Minneapolis, Minnesota
21. Claussen, A., Edwards J., Sommer, P. and Uge, P. 1977. *Asphalt Pavement Design--The Shell Method. Proceedings*, 4TH International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Vol. 1. pp. 39-75.
22. Collop, C. and Cebon, D., 1997. *Effects of 'Road Friendly' suspensions on long-term flexible pavement performance*. J. Mech. Eng., Vol 211, Part C, pp 411-424,
23. Collop, A., Cebon D., 1995. *A Visco-Elastic Approach to Rutting in Flexible Pavements*. Journal of transportation engineering, Vol. 121(January/February 1995), No.1, pp.82-93.
24. Collop, C., Scarpas, A. T., Kasbergen, C., and deBondt, A. 2003. *Development and Finite Element Implementation of a Stress Dependent Elasto-visco-plastic Constitutive Model with Damage for Asphalt*. Presented at the Transportation Research Board (TRB) 82nd Annual Meeting (CD ROM), National Research Council, Washington, D.C

25. COST-334, 2002. *Final report of Cost Action 334: Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres*. 7th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, 18th June 2002 Delft, Netherlands. <http://cordis.europa.eu/cost-transport/src/cost-334.htm>
26. Corté J. F. et Di Benedetto H. 2004. **Matériaux routiers bitumineuse** Hermes Lavoisier Vol 1.
27. Corté J.-F., Brosseaud Y., Kerzreho J.-P. et Spornol A. 1997. *Study of Rutting of Wearing Courses on the L.C.P.C Test Track*. 8th International Conference on Asphalt Pavements. Seattle.
28. Desai, C. S., and Zhang, D. (1987). *Viscoplastic Model for Geologic Materials with Generalized Flow Rule*. International Journal for Numerical and Analytical. Methods in Geomechanics, 11, pp. 603-620.
29. Desmoulin, D., GIGUET, P., ORTEGA, P., DABERT J-L., LEROUX, C. 2005 *Entretien autoroutier : Essais comparatifs de liants et de bitumes spéciaux sur un enrobé mince anti-orniérant (Motorway maintenance Comparative testing of special bitumens and binders on thin antirutting asphalt)*. Revue générale des routes. ISSN 1290-256X no842, pp. 79-84
30. De Beer, M., and Fisher, C. 1997. *Contact Stresses Of Pneumatic Tires Measured With The Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array (VRSPTA) System*. For the University of California at Berkeley (UCB) and the Nevada Automotive Test Centre (NATC). Confidential Contract Research Rep. CR-97/053, Transport, Pretoria, South Africa.
31. Duhamel, D., Nguyen. V-h., Chabot, A. et Tamagny, P., 2003. *Modélisation De Chaussées Viscoélastiques 16^{ème}*. Congrès Français de Mécanique Nice, 1-5 septembre
32. Ekdahl, P. 1999. *A Sensitivity Test of Two Deterioration Models for Flexible Pavements*. Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology Rep, Lund University, Sweden.
33. Fang, H. 2001. *Rational Approach to Rutting Rehabilitation Decisions*. Thesis submitted to the faculty Purdue University on partial fulfilment of the requirement for the degree of doctor philosophy.
34. Fang, H, Haddock, J., White, T. and Hand, A., 2004. *On The Characterization Of Flexible Pavement Rutting Using Creep Model-Based Finite Element Analysis*. Journal of Finite Elements in Analysis and Design Volume 41, Issue 1, pp 49-73
35. Fannin, R., Sigurdsson, O. 1996. *Field Observations on Stabilization of Unpaved Roads with Geosynthetics* J. Geotech. Engrg., Volume 122, Issue 7 July, pp. 544-553
36. Finn, F., C. Saraf, R. Kulkarni, K. Nair, W. Smith and A. Abdullah. 1986. *Development of Pavement Structural Subsystems*. NCHRP Report 291, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board. Washington D.C.

37. Florea, D. 1995b. *Nonassociated Elastic/Viscoplastic Model for Bituminous Concrete*. International Journal of Engineering Science, Volume 32, Issue1, pp.87-93
38. Florea, D. 1995a, *Associated Elastic/Viscoplastic Model for Bituminous Concrete*. International Journal of Engineering Science, volume 32, issue1, pp.79-86.
39. Gidel, M. 2001. *Comportement et Valorisation des Graves non Traitées Calcaires Utilisées Pour les Couches d'Assise des chaussées souple*. Thèse présentée à Ecole doctoral de la science physique de l'ingénieur. Bordeaux, France
40. Gillespie, D., Karanuhus, M., Sayers, W., Nasim, A., Hansen, W., Ehsan, N., and D. Cebon. 1993. *Effects of Heavy-Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance*. NCHRP Report 353. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board. Washington. pp. 132.
41. Haddock, J., Hand, A., Fang, F. and White, T. 2005. *Determining Layer Contributions to Rutting by Surface Profile Analysis*. Journal. Transp. Engrg., Volume 131(February 2005), Issue 2, pp. 131-139
42. Huang, Y.H. 1993. *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
43. Huang, B., Mohamad, L., and Wathugala, W., 2002. *Development of a Thermo-Viscoplastic Constitutive Model for HMA Mixtures*. Presented at the Association of Asphalt Meeting (CD ROM), Colorado Springs, Paving Technologists 77th Annual.
44. Kandhal, P., Mallick, R. et Brown, E. 1998. *Hot Mix Asphalt for Intersections in Hot Climates*. National Centre for Asphalt Technology Auburn University, Alabama NCAT Report 98-06.
45. Kandhal, S., Cross. A., and Brown, R. 1993. *Heavy Duty Asphalt Pavements in Pennsylvania. An Evaluation for Rutting*. Transportation Research Board (TRB), Transportation Research Record, Report.1384.
46. Karlsson, H., and Pawtucket, S. 2003. *ABAQUS user's manual-version 6.4*. (2003).
47. Kim, D., Salgado, R. and Altschaeffl, A. 2005. *Effects of Super single Tire Loadings on Pavement*. J. Transp. Engrg., Volume 131(October 2005), Issue 10, pp. 732-743
48. Krarup, J., 1994. *Bearing Capacity and Water, Part II: Measured Response*. Danish Road Institute, Note 249.
49. Kim, Y. R., Lee, H.-J., and Little, D. 1997. *Fatigue Characterization of Asphalt Concrete using Viscoelasticity and Continuum Damage Theory*, Association of Asphalt Paving Technologists, 66, 520-569
50. Lytton, R., Uzan, J., Emmanuel, Reynaldo, R., Dennis H. and Shelley S. 1993 *Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes*. SHRP-A-357 Strategic Highway Research Program

51. Lenngren, L., 2004. ***Initial Rutting On Reconstructed Roads And How It Relates To FWD Testing II***. Minneapolis Minnesota accelerated pavement testing international conference September 26-29, 2004.
52. Lee, H.-J., Daniel, J. S., and Kim, Y. R. 2000. ***Continuum Damage Mechanics- Based Fatigue Model of Asphalt Concrete***. Journal of Materials in Civil Engineering, 12(2), 105-113.
53. Lu, Y., and Wright, J. 1998. ***Numerical Approach of Visco-Elastoplastic Analysis for Asphalt Mixtures***. Journal of Computers & Structures, 69, 139-157.
54. Luo, R. and Prozzi, J. 2005 ***Evaluation of the Joint Effect of Wheel Load and Tire Pressure on Pavement Performance*** Research Report SWUTC/05/167245-1 Center for Transportation Research University of Texas at Austin Austin, Texas.
55. Lytton, L., Uzan, J., Fernando, G., Roque, R., Hiltunen, D., and Stoffels, M. 2003 ***Development And Validation Of Performance Prediction Models And Specifications For Asphalt Binders And Paving Mixes***. Strategic Highway Research Program Report No. SHRP-A- 357, National Research Council, Washington, D.C.
56. MacDonald, B. 2001. ***Measures, Markers and Mileposts*** WSDOT's quarterly report to the Washington State Transportation Commission on transportation programs and department management
57. Masad, E., Little, D., Tashman, L., Saadeh, S., Al-Rousan, T. and Sukhwani, R. 2003. ***Evaluation of Aggregate Characteristics Affecting HMA Concrete Performance***, Report ICAR 203, International Center for Aggregate Research.
58. Masada, T., Shad, M., Abdalla, B. and Figueroa, J. 2004. ***Material Properties for Implementation of Mechanistic-Empirical (M-E) Pavement Design Procedures***. Final report of Ohio research institute for transportation & the environment, Ohio University.
59. Mallela, J., Quintus, H. Smith, K. 2004. ***Consideration Of Lime-Stabilized Layers In Mechanistic-Empirical Pavement Design***. Submitted to The National Lime Association
60. Olsson, J., Zeng, L. and Wiberg, N. 2000. ***Finite Element Analysis of Road Rutting***. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS, Barcelona, Spain.
61. Park, D-W., Martin, A. and Masad, E., 2005. ***Effects of Nonuniform Tire Contact Stresses on Pavement Response***. Journal of Transportation Engineering Volume 131, Issue 11, pp. 873-879 (November 2005)
62. Panoskaltsis, V., Panneerselvam, D. 2005. ***An Anisotropic Hyperelastic-Viscoplastic Damage Model for Asphalt Concrete Materials and Its Numerical Implementation***. 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics Limassol, 29 June – 1 July.

63. Pierre, P., Doré, G. et Vagile, L. 2003. *Characterization and Evaluation of Tire-Roadway Interface Stresses*. Report GCT-03-03 Submitted by University of Laval to the Ministère des Transports du Québec
64. Perret, J., Dumont, A., Turtschy J., Ould-Henia M. 2001. *Rapport de recherche : Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement (1ère partie) : Enrobés à haut module*, OFROU (Office fédéral des routes), décembre 2001.
65. Perret, J. 2003. *Déformation des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic*. Thèse présentée à l'EPFL Lausanne.
66. Panoskaltsis, V. and Panneerselvam, D. 2005. *An Anisotropic Hyperelastic-Viscoplastic Damage Model for Asphalt Concrete Materials and Its Numerical Implementation*. 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics Limassol, 29 June – 1 July,
67. Romanoschi, S., Hossain, M., Gisi, A. and Heitzmann M. 2004. *Accelerated Pavement Testing Evaluation of the Structural Contribution of Full-Depth Reclamation Material when Stabilized with Foamed Asphalt* Paper 04-3811 presented at TRB 2004 Annual Meeting
68. Reddy, B., Veeraragavan, A. 1997. *Structural Performance of In-service Flexible Pavements* J. Transp. Engrg., Volume 123(March/April), Issue 2pp. 156-167
69. Stolarski, H., 1999. *Load Testing of Instrument Pavement Section*, prepared by: University of Minnesota Department of Civil Engineering submitted to: Mn/DOT Office of Materials and Road Research Maplewood.
70. Sousa, J. B., and Weissman, S. L. 1994, *Modelling Pavement Deformation of Asphalt-Aggregate Mixes*. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 63, pp. 224-257.
71. Sousa. B., and Weissman. S. 1994. *Modelling Permanent Deformation of Asphalt Aggregate Mixes*. Association of Asphalt Paving Technologist, Volume 63.
72. SHRP-A-415 1994. *Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes* Asphalt Research Program Strategic Highway Research Program University of California.
73. Scarpas, A., Al-Khoury, R., Van Gurp, C., and Erkens, S. M. 1997. *Finite Element Simulation of Damage Development in Asphalt Concrete Pavements*. Proceedings of 8th International Conference on Asphalt Pavements, University of Washington, Seattle, WA, 673-692.
74. Schwartz, C., Gibson, N., Schapery, R., and Witczak, M. 2002. *Viscoplasticity Modelling of Asphalt Concrete*. Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Conference (CD ROM), Columbia University, New York.

75. Seibi, C., Sharma, G., Ali, A. and Kenis, J. 2001. ***Constitutive Relations for Asphalt Concrete under High Rates of loading transportation***. Research Record 1767, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, pp111-119. <http://pavement.wpi.edu/LabData/!DATA/THESIS/Sean/Literature/00159.pdf>
76. Si, Z. Little, D. and Lytton, R. 2002. ***Characterization of Microdamage and Healing of Asphalt Concrete Mixture***. Journal Of Materials In Civil Engineering/ November/December 461-470
77. Simpson, A., 1999. ***Characterization of Transverse Profile***. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 128(5), pp. 586-591.
78. Skok, E. Johnson, A. 2002. ***Asphalt Pavement Analyses (APA) Evaluation***. Technical report, Minnesota department of transportation, September.
79. Shanmugam, P., Musharraf, Z. et Tarefder, R. 2003. ***Evaluation Of Rutting Potential In Asphalt Mixes Using Finite Element Modelling***. Paper prepared for presentation at the Long-life Pavements Contributing to Canada's Infrastructure, session of the 2003 Annual Conference of the Transportation Association of Canada
80. Saad, B., Mitri, H. and Poorooshab, H. 2006. ***3D FE Analysis of Flexible Pavement with Geosynthetic Reinforcement***. J. Transp. Engrg., Volume 132(May 2006), Issue 5, pp. 402-415.
81. Saleh, M., Steven, B. and Alabaster, D. 2003. ***Three Dimensional Nonlinear Finite Element Model To Simulate The Pavement Response In The Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility "CAPTIF"***. Journal of Transportation Research Board, pp 153.
82. Sebaaly, P., and Tabatabaee, N. 1992. ***Effect of Tire Parameters on Pavement Damage and Load-Equivalency Factors***. Journal of Transportation Engineering, Vol. 118 (November/December) No. 6, 1992, pp. 805-819
83. Schapery, A. 1982. ***Models for Damage Growth and Fracture in Nonlinear Viscoelastic Particulate Composites***, Proceedings of the 9th U.S. National Congress of Applied Mechanics, ASME, 237-255.
84. Schapery, R. A. 1995. ***Nonlinear Viscoelastic Constitutive Equations for Composites Based on Work Potentials***. Proceedings of the 12th U.S. National Congress of Applied Mechanics, Applied Mechanics Reviews, 57, 269-275.
85. Sousa, J. Craus, J. and Monismith, C. 1991. ***Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete***. SHRP-A/IR-91-104, Strategic Highway Research Program.
86. Simpson, A. 2001. ***Characterization of Transverse Profiles***. FHWA-RD-01-024, Federal Highway administration. Highway Research Center, Georgetown Pike

87. Stolarski, H. 1999. *Load Testing of Instrument Pavement Section*, prepared by: University of Minnesota Department of Civil Engineering submitted to: Mn/DOT Office of Materials and Road Research Maplewood.
88. Szydło, A., and Mackiewicz, P. 2005. *Asphalt Mixes Deformation Sensitivity to Change in Rheological Parameters* J. Mat. in Civ. Engrg., Volume 17 (January/February), Issue 1, pp. 1-9
89. Timm, D, Priest, A. 2005. *Wheel Wander at the NCAT Test Track*. National Centre for Asphalt Technology. Report NCAT 05-02 Auburn University, Auburn, Alabama.
90. Tran, D. 2004. *Model Simplified Pour Chaussées Fissures Multicouches*. Thèse présentée pour obtenir le de doctorante école nationale de pont et chaussées.
91. Tran, D. Chabot, A., Ehrlacher, A. et Tamagny, T. 2003. *Modele Simplif'E Pour Le Calcul De Chaussées*. 16 eme Congres Français de Mécanique Nice, 1-5 septembre
92. Tashman, L. Masad, E., Zbib, H., Little, D.,2003. *A Constitutive Model For Permanent Deformation Of Asphalt Mixes*. 16h ASCE Engineering Mechanics Conference July 16-18 2003 University of Washington Seattle
93. Tutumluer, E. 1998. *Anisotropic Behavior of Unbound Aggregate Bases – State of the Art Summary*. In Proceedings of the 6th Annual Symposium of the International Center for Aggregate Research (ICAR), St. Louis, Missouri, April 19-21, 11-33.
94. Tashman, L. Masad. E., Zbib, H., Little, D. and Kaloush, K.2005. *Micro structural Viscoplastic Continuum Model for Permanent Deformation in Asphalt Pavements*. J. Engrg. Mech., Volume 131(January 2005), Issue 1, pp. 48-57
95. Ullidtz, P. 1998. *Deterioration Models for Managing Flexible Pavements*. Paper Offered for Presentation at the 78 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, 1998.
96. Uzan, J. 1996 *Asphalt Concrete Characterization for Pavement Performance Prediction*. Association of Asphalt Paving Technologists, 65, 573-607
97. Uzarowski, L., Paradis, M., Lafarge, Paul. 2004. *Accelerated Performance Testing Of Canadian Asphalt Mixes Using Three Different Wheel Rut Testers*. Paper prepared for presentation At the Accelerated Field and Laboratory Pavement Testing Session Of the 2004 Annual Conference of the Transportation Association of Canada Quebec City, Quebec
98. Wasage, T., Ong, G., Fwa, T., and Tan, A. 2004. *Laboratory Evaluation of Rutting Resistance of Geosynthetics Reinforced Asphalt Pavement*. Journal of The Institution of Engineers, Singapore Vol. 44 Issue pages 29-44.
99. Wang, F Machemehl, R. 2004. *An Analytical Verification of the Effects of Tire Pressure on Pavement with Data from Washington State*. DOT TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM

100. Werkmeister, S., Dawson and A., Wellner, F. 2004. ***Pavement Design Model for Unbound Granular Materials***. J. Transp. Engrg., Volume 130 (September/October 2004), Issue 5, pp. 665-674
101. White, T., J. Hua, and Galal. K. 1999. ***Analysis of Accelerated Pavement Tests***. Preprint of Proceedings of the International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno, Nevada, October.
102. Wardle, J., Youdale, G. and Rodway, B. 2003. ***Current Issues For Mechanistic Pavement Design***. In 21st ARRB and 11th REAAA (Road Engineering Association of Asia and Australasia) Conference, Cairns, Australia, 18 - 23 May, Session S32, ARRB Transport Research.
103. White, T., Haddock, J., Hand, A and Fang, H. 2002. ***Contributions of pavement structural layers to rutting of hot mix asphalt pavements***. NCHRP Rep. 468, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.
104. Wasage1, T., Ong, G. and Tan, S., 2004. ***Laboratory Evaluation Of Rutting Resistance Of Geosynthetics Reinforced Asphalt Pavement***. Journal of the Institution of Engineers, Singapore Vol. 44 Issue 2, pp 29-44.
105. Weissman, S., Harvey, J., Sackman, J., and Long, F. 1999. ***Selection of Laboratory Test Specimen Dimensions for Permanent Deformation of Asphalt Concrete Pavements***. published in Transportation Research Record, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, 1999.
106. Xu, S., Zhou, Z., Qian, P., Deme, I. 2004. ***Use of a Premium SBS Modified Bitumen to Combat Severe Rutting in Asphalt Pavement***. 8th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering
107. Yandell, BEHZADI, G. 1999 ***Rutting Prediction of Twelve Accelerated Loading Accelerated Pavement Testing*** International Conference Reno, Nevada - October 18 – 20,
108. Yavuzturk, C., Ksaibati, K. and Chiasson, A. D. 2005. ***Assessment Of Temperature Fluctuations In Asphalt Pavements Due To Thermal Environmental Conditions Using A Two-Dimensional, Transient Finite-Difference Approach*** Journal Of Materials In Civil Engineering ,ASCE / July/August 465- 475
109. Zubeck, H., Raad, L., Saboundjian, S., Minassian, G. and Ryer, J. 2002. ***Performance of Polymer-Modified Asphalt-Aggregate Mixtures in Alaska*** J. Cold Reg. Engrg., Volume 16(December), Issue 4pp. 170-190
110. Zaniwski, J., and S. Nallamotheu, 2003. ***Evaluation of Binder Graded on Rutting Performance***. Report of the West Virginia Highways Department, June, 2003.

Annexe 2.A

Déformation viscoplastique

On présente dans cette annexe le développement théorique de la déformation viscoplastique et la méthode de détermination de ces paramètres.

On suppose que la déformation viscoplastique suit une loi d'écrouissage avec le temps (strain hardening model) d'Uzan et al. (1985) :

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \frac{g(\sigma)}{\eta_{vp}} \quad 2. A.1$$

$\dot{\varepsilon}^{vp}$: vitesse de déformation viscoplastique

η_{vp} : coefficient de viscosité du matériau

On suppose que η_{vp} s'écrit comme une loi en puissance (Uzan et al. 1985) :

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \frac{g(\sigma)}{k \varepsilon^{vpR}} \quad 2. A.2$$

k et R sont les coefficients du modèle.

$$\frac{d\varepsilon^{vp}}{dt} = \frac{g(\sigma)}{k \varepsilon^{vpR}} \quad 2. A.3$$

$$d\varepsilon^{vp} \times \varepsilon^{vpR} = \frac{g(\sigma) dt}{k} \quad 2. A.4$$

$$\varepsilon^{vpR+1} = \frac{R+1}{k} \int_0^t g(\sigma) dt \quad 2. A.5$$

Pour l'essai de fluage (contrainte constante), on suppose que $g(\sigma) = B\sigma^q$ où σ est la contrainte équivalence du fluage uni axial.

$$\varepsilon^{vp} = \left(\frac{R+1}{k} \times B\sigma \right)^{1/R+1} \left(\int_0^t dt \right)^{1/R+1} \quad 2. A.6$$

$$\varepsilon^{vp} = \left(\frac{R+1}{k} \times B\sigma \right)^{1/R+1} t^{1/R+1} \quad 2. A.7$$

$$\varepsilon^{vp} = \left(\frac{R+1}{k} \right)^{1/R+1} (B\sigma^q)^{1/R+1} t^{1/R+1} \quad 2. A.8$$

En supposant que $(m+1) = \frac{1}{1+R}$, $n = \frac{q}{1+R}$, $A' = \frac{1}{1+n} \left(\frac{(R+1) \times B}{k} \right)^{1/R+1}$ l'équation 2.A.8

devient :

$$\varepsilon^{vp} = A' \sigma_t^n m^{m+1} \quad 2.A.9$$

n , m et A' sont des paramètres déterminés à partir de deux séries d'essais de fluage et recouvrance en mesurant la déformation viscoplastique : 1-sous contrainte fixée et temps de chargement variable (Figure 2.A.1 et l'équation 2.A.1)

2- temps de chargement fixé avec différents niveaux de contrainte (Figure 2.A.2 et l'équation 2.A.2) (Chehab 2002) :

$$\frac{\varepsilon^{vp2} - \varepsilon^{vp1}}{\varepsilon^{vp1}} = \left(\frac{\xi_3 - \xi_2}{\xi_1 - \xi_0} \right)^{m+1} \quad 2.A.10$$

$$\frac{\varepsilon^{vp2} - \varepsilon^{vp1}}{\varepsilon^{vp1}} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^n \quad 2.A.11$$



Fig. 2 : A1 Cycle de chargement à contrainte constante

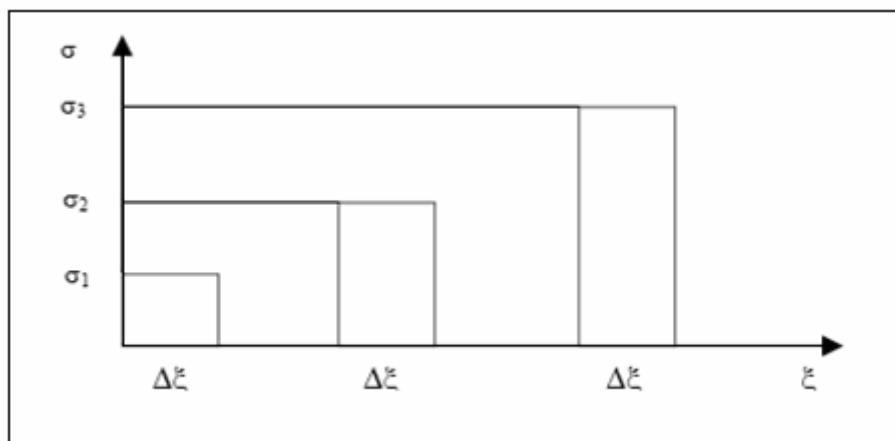


Fig. 2 : A2 Cycle de chargement à contrainte variable