



المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

National School of Built and Ground Works Engineering

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : INFRASTRUCTURES DE BASE

Thème

**Analyse de l'agressivité du trafic routier
dans les carrefours à giratoire**

Proposé par :

Pr. DERRICHE Zohra

Présenté par l'ingénieur:

KADRI Abderraouf

Remerciement

Tout d'abord, je remercie notre « **DIEU** » qui m'a donné la force et l'aide à accomplir ce modeste travail.

Je remercie ma famille pour tout le support et les sacrifices durant les cycles d'étude.

Je remercie mon encadreur « **PR DERRICHE ZOHRA** » pour les conseils et l'aide durant la période de l'élaboration de ce travail.

Je remercie tous les enseignants et l'équipe de l'ENSTP

Je remercie mes collègues qui ont participé de près ou de loin afin d'accomplir ce travail avec succès.

KADRI ABDERRAOUF

Résumé

Le passage des véhicules lourds dans un carrefour giratoire augmente l'endommagement de la chaussée routière et provoque le décollement au niveau des interfaces à cause de la force centrifuge qui s'applique, ce qui conduit à des dégradations prématurées.

On mène dans cette étude résumée en quatre chapitres une recherche bibliographique et une analyse de l'effet de décollement des couches de la structure routière sur le comportement de la chaussée. On fait aussi une estimation de coefficient d'agressivité du poids lourd sous l'effet de la dissymétrie de chargement vertical par essieu en se basant sur un modèle numérique à l'aide de 'ALIZE', L'agressivité du trafic est ensuite déterminée à partir des durées de vie en fatigue en section courante et en giratoire.

Mots clés : Poids lourds, chaussée, carrefour giratoire, dissymétrie, cisaillement.

Abstract

The passage of heavy trucks on the curved road section increases the damage to the road pavement and causes peeling at the interlayers due to the centrifugal force applied, leading to premature degradation.

In this study summarized in four chapters, we have a literature search and analysis of the effect of layers peeling of the road structure on the behavior of the pavement. We also calculate an aggressiveness coefficient of heavy trucks under the effect of the asymmetry of vertical load axle based on a numerical model using 'ALIZE'. The aggressiveness of traffic is then determined from these fatigue lives expectancy in current section and curved road section.

Keywords: heavy trucks, road pavement, curved road section, asymmetry, shear.

ملخص

مرور المركبات الثقيلة في المنعطفات الضيقة وفي مفترقات الطرق الدوارة يزيد من الأضرار التي تلحق رصف الطرق ويسبب تقشير في طبقات بسبب قوة الطرد المركزي المطبقة مما يؤدي إلى اهتلاكها وتآكلها قبل الأوان.

في هذه الدراسة الموجزة في أربعة فصول: نقوم ببحث أدبي في الموضوع، إضافة إلى تحليل تأثير تقشير طبقات هيكل الطريق على سلوك الطريق. وأيضاً تقدير معامل العدوانية للوزن الثقيل تحت تأثير التباين العمودي لمحور الحمل على أساس نموذج رقمي باستخدام ALIZE.

كلمات مفتاحية: المركبات الثقيلة، رصف الطريق، مفترق الطرق، التباين العمودي، القص

Table des matières

REMERCIEMENT.....	1
RESUME	2
TABLE DES MATIERES.....	3
LISTE DES FIGURES	5
LISTE DES TABLEAUX.....	6
INTRODUCTION	7
CHAPITRE I. FONCTIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSEE	8
I.1. INTRODUCTION	8
I.2. DEFINITION ET CONSTITUTION D'UNE CHAUSSEE ROUTIERE.....	8
I.3. CONSTITUTION ET ROLE D'UNE CHAUSSEE ROUTIERE	8
I.4. DIFFERENTS TYPES DE STRUCTURES DE CHAUSSEE	9
I.5. DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE.....	10
I.5.1. <i>La méthode française de dimensionnement des chaussées.....</i>	<i>10</i>
I.5.2. <i>La méthode américaine de dimensionnement [AASHTO]</i>	<i>12</i>
I.5.3. <i>La méthode algérienne de dimensionnement.....</i>	<i>13</i>
I.6. DEFINITION DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE.....	15
I.7. MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA CHAUSSEE	17
I.7.1. <i>Notion de trafic équivalent</i>	<i>18</i>
I.7.2. <i>Courbe de Wöhler</i>	<i>19</i>
CHAPITRE II. FONCTIONNEMENT DE LA CHAUSSEE AU NIVEAU DES GIRATOIRES	20
II.1. INTRODUCTION	20
II.2. EQUILIBRE MECANIQUE DANS UN GIRATOIRE	20
II.3. INFLUENCE DE TYPE D'INTERFACE SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA CHAUSSEE	24
II.3.1. <i>Interface.....</i>	<i>24</i>
II.3.2. <i>Interfaces entre couches de chaussée.....</i>	<i>24</i>
II.3.3. <i>Fonctionnement de l'interface.....</i>	<i>24</i>
II.3.4. <i>Décollement des couches de revêtements des chaussées.....</i>	<i>24</i>
II.3.5. <i>Etat des interfaces au niveau des carrefours giratoires.....</i>	<i>25</i>
II.3.6. <i>Influence de l'état de l'interface sur la distribution des déformations</i>	<i>25</i>
II.4. CONCLUSION	29
CHAPITRE III. FATIGUE DES INTERFACES	30
III.1. INTRODUCTION	30
III.2. ESSAIS DE CARACTERISATION DE L'ETAT D'INTERFACE	30

III.2.1.	Caractérisation de l'état de l'interface par Contrôle Non Destructif	30
III.2.2.	Caractérisation de l'état de l'interface par Contrôle Destructif	33
III.3.	FACTEURS INFLUENÇANT LA PERFORMANCE MECANIQUE DE L'INTERFACE	40
III.3.1.	Effet de la rugosité de l'interface	41
III.3.2.	Effet du dosage en couche d'accrochage	41
III.3.3.	Effet de la contrainte normale à l'interface	42
CHAPITRE IV. EVALUATION DE L'AGRESSIVITE DU POIDS LOURDS DANS LES CARREFOURS		
GIRATOIRES.....		44
IV.1.	INTRODUCTION	44
IV.2.	STABILITE D'UN POIDS LOURD DANS UN GIRATOIRE	44
IV.3.	PRESENTATION DES STRUCTURES DE CHAUSSEE ETUDIEES	45
IV.4.	ETUDE D'UNE SECTION COURANTE DE LA CHAUSSEE	46
IV.4.1.	Dimensionnement par la méthode classique	46
IV.4.2.	Hypothèses de calcul.....	46
IV.4.3.	Résultat de simulation en section courante à l'aide d'ALIZE-LCPC	47
IV.5.	DIMENSIONNEMENT EN TENANT COMPTE DE LA DISSYMETRIE DE L'ESSIEU	48
IV.5.1.	Résultats de la simulation	49
IV.5.2.	Coefficients d'agressivité	50
IV.6.	CONCLUSION	53
CONCLUSION GENERALE		54
BIBLIOGRAPHIE.....		55

Liste des figures

FIGURE I-1: COUPE TYPE D'UNE STRUCTURE DE CHAUSSEE ET TERMINOLOGIE DES DIFFERENTES COUCHES.....	8
FIGURE I-2: MASSIF MULTICOUCHE ET CHARGE DE REFERENCE (LCPC-SETRA, 1994).....	12
FIGURE I-3: ZONES CLIMATIQUES EN ALGERIE.....	14
FIGURE I-4: CLASSES DU TRAFIC POIDS LOURD	14
FIGURE I-5: FONCTIONNEMENT DE LA CHAUSSEE BITUMINEUSE.....	17
FIGURE I-6: ESSIEU SIMPLE EQUIVALENT DE 13T.....	18
FIGURE I-7: COURBE DE WÖHLER (FR.WIKIPEDIA.ORG)	19
FIGURE II-1: DEFORMATION D'UN PNEU AU NIVEAU DE CARREFOUR GIRATOIRE	21
FIGURE II-2: DEGRADATIONS PREMATURES AU NIVEAU DES GIRATOIRES	21
FIGURE II-3: DERAPAGE D'UN POIDS LOURD AU NIVEAU D'UNE SECTION COURBE	21
FIGURE II-4: ÉQUILIBRE D'UN ESSIEU SOUS L'ACTION D'UNE FORCE TRANSVERSALE	22
FIGURE II-5: CONTRAINT-DEFORMATION DANS LA CHAUSSEE CONSIDERANT L'INTERFACE BB/GB COLLEE.....	26
FIGURE II-6: CONTRAINT-DEFORMATION DANS LA CHAUSSEE CONSIDERANT L'INTERFACE BB/GB SEMI COLLEE	27
FIGURE II-7: CONTRAINT-DEFORMATION DANS LA CHAUSSEE CONSIDERANT L'INTERFACE DECOLLEE.....	28
FIGURE II-8: VARIATION DE LA DEFORMATION TRANSVERSALE AU NIVEAU DE L'INTERFACE (ROULEMENT/BASE).....	29
FIGURE III-1: MESURE DE DEPLACEMENT VERTICAL PAR LE DEFLECTOGRAPHE	31
FIGURE III-2: APPAREILLAGE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU FWD (WWW.INFRALAB.CH)	32
FIGURE III-3: PRINCIPE DES METHODES D'AUSCULTATION DYNAMIQUE ET PROTOTYPE COLIBRI DU LCPC	33
FIGURE III-4: MODES DE SOLLICITATION DE L'INTERFACE SOUS CONDITIONS DE TRAFIC	34
FIGURE III-5: DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE L'ESSAI D'OVALISATION.....	36
FIGURE III-6: ESSAI DE TORSION : PRINCIPE D'ESSAI ET EXEMPLES DE DISPOSITIFS D'ESSAI (CRM EUROVIA)	37
FIGURE III-7: ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT : PRINCIPE ET EXEMPLES DE DISPOSITIFS D'ESSAI	39
FIGURE III-8: ESSAI DE DOUBLE CISAILLEMENT : PRINCIPE ET EXEMPLE DE DISPOSITIF D'ESSAI.....	40
FIGURE III-9: EFFET DE LA RUGOSITE DE L'INTERFACE SUR LA PERFORMANCE DU COLLAGE	41
FIGURE III-10: EFFET DU DOSAGE EN EMULSION SUR LA PERFORMANCE MECANIQUE DU COLLAGE A L'INTERFACE	42
FIGURE IV-1: CHARGE DE REFERENCE : ESSIEU 13 TONNES.....	47
FIGURE IV-2: DEFORMATION HORIZONTALE (DE TRACTION) EN SECTION COURANTE.....	47
FIGURE IV-3: CHARGEMENT LIE A LA VITESSE ET AU RAYON DE GIRATOIRE	49

Liste des tableaux

TABLEAU I-1: PRINCIPALES STRUCTURES TYPES DE CHAUSSEE	10
TABLEAU I-2: METHODES DE DIMENSIONNEMENT : TYPES D'ESSIEU STANDARD ET PERFORMANCE DU SUPPORT	15
TABLEAU I-3: METHODES DE DIMENSIONNEMENT : PERFORMANCE MECANIQUE DES COUCHES DE CHAUSSEE	15
TABLEAU IV-1: CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET MECANIKES DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE S2/TPL4.....	45
TABLEAU IV-2: CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET MECANIKES DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE S1/TPL5.....	45
TABLEAU IV-3 CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET MECANIKES DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE S2/TPL6.....	45
TABLEAU IV-4: CARACTERISTIQUES MECANIKES DU SOL SUPPORT POUR LES TROIS STRUCTURES.....	46
TABLEAU IV-5: CONTRAINTES VERTICALES DU JUMELAGE EN FONCTION DE LA VITESSE ET LE RAYON DE GIRATOIRE.....	48
TABLEAU IV-6: RESULTATS DE LA SIMULATION DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE S2/TPL4.....	49
TABLEAU IV-7: RESULTATS DE LA SIMULATION DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE S1/TPL5	50
TABLEAU IV-8: RESULTATS DE LA SIMULATION NUMERIQUE DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE S2/TPL6	50
TABLEAU IV-9: VALEURS DU TRAFIC EQUIVALENT ET COEFFICIENTS D'AGRESSIVITE EN FONCTION DE LA VITESSE ET LE RAYON DU GIRATOIRE DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE S2/TPL4	52
TABLEAU IV-10: VALEURS DU TRAFIC EQUIVALENT ET COEFFICIENTS D'AGRESSIVITE EN FONCTION DE LA VITESSE ET LE RAYON DU GIRATOIRE DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE S1/TPL5	52
TABLEAU IV-11: VALEURS DU TRAFIC EQUIVALENT ET COEFFICIENTS D'AGRESSIVITE EN FONCTION DE LA VITESSE ET LE RAYON DU GIRATOIRE DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE S2/TPL6	53

INTRODUCTION GÉNÉRALE

ENS 2015

INTRODUCTION

Le dimensionnement du corps de chaussée routière représente une partie très importante dans les études des routes. Il dépend principalement du pourcentage du poids lourds à cause de son influence et agressivité sur les couches de chaussées.

Une chaussée est une structure composite réalisée par empilement de couches de matériaux liées entre elles ou non par des couches d'accrochage et permettant la circulation des biens et des personnes. Sous le passage répété des charges roulantes, les matériaux de chaussée s'endommagent par fatigue. C'est sur ce mécanisme que s'appuie le dimensionnement rationnel des structures de chaussée.

Au passage de chaque véhicule la chaussée accuse une petite fatigue. De ce point de vue les poids lourds sont particulièrement agressifs : le passage d'un essieu de 13 tonnes a autant d'effet sur la structure de la chaussée que celui d'un million de véhicules de tourisme .La répétition des charges entraînent une fatigue générale de la chaussée qui présente alors des dégradations.

On remarque aussi l'augmentation de l'effet du poids lourds au niveau des sections courbées et des carrefours giratoires .Parce qu'en plus de la charge verticale due au poids des camions, une autre charge horizontale s'applique au niveau des virages en créant une contrainte de cisaillement à cause de la force centrifuge ,ce qui provoque des dégradations prématurées et un décollement au niveau des interfaces entre couches.

Le frottement des pneumatiques en mouvement sur la couche de roulement conduit également par usure à son vieillissement.

Les efforts tangentiels et transversaux notamment pour les chaussées de giratoire peuvent donner lieu à des dégradations importantes de la chaussée. L'expérience montre que les dégradations de la chaussée au niveau des sections courbes sont toujours prématurées par rapport à celles enregistrées dans les sections droites de la chaussée.

Les chercheurs montrent que ce problème doit être étudié en détail pour pouvoir évaluer l'agressivité du trafic au niveau des carrefours à giratoire différemment de celle des sections droites qui est utilisée dans les catalogues de dimensionnement.

CHAPITRE I :
FONCTIONNEMENT DES
STRUCTURES DE CHAUSSEE

Chapitre I. Fonctionnement des structures de chaussée

I.1. INTRODUCTION

Le passage répété des poids lourds entraîne progressivement l'endommagement dans le temps des structures de chaussée. Ces structures en service, sont soumises à des sollicitations très complexes. La circulation automobile et les conditions climatiques ont une influence sur la durabilité mécanique des matériaux de chaussées. Le mode de sollicitation de ces matériaux conditionne alors le dimensionnement d'une chaussée.

I.2. Définition et constitution d'une chaussée routière

Une chaussée routière est une structure multicouche plane (FigureI-1) conçue et dimensionnée pour garantir l'écoulement du trafic dans de bonnes conditions de sécurité et de confort pour les usagers et assurer cette fonction sur une période de service minimale fixée dès l'avant-projet.

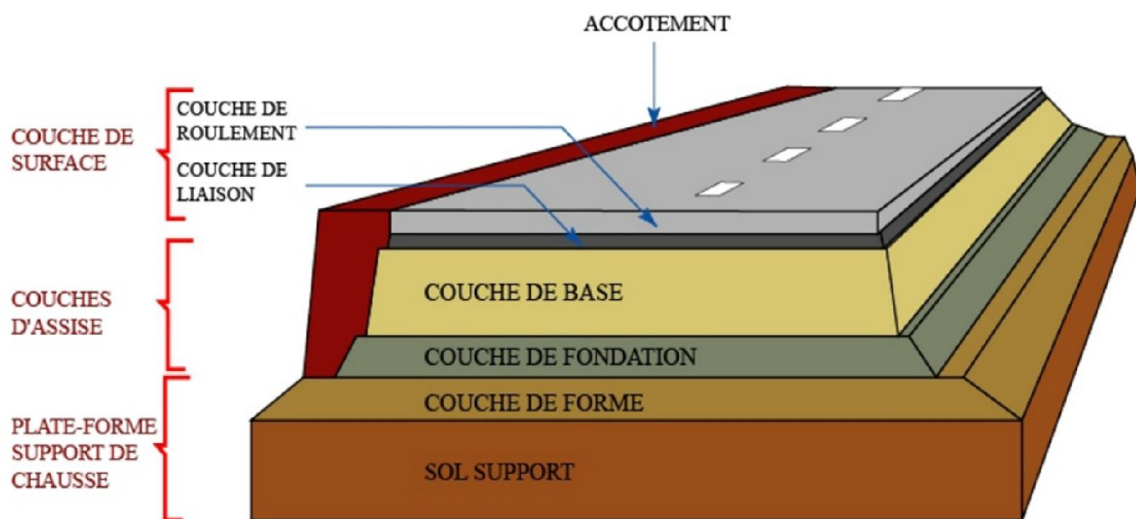


Figure I-1: Coupe type d'une structure de chaussée et terminologie des différentes couches

I.3. Constitution et rôle d'une chaussée routière

Procédant de bas en haut on a, le sol terrassé ou sol support qui est surmonté généralement d'une couche de forme. L'ensemble sol-couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée. La couche de forme a une double fonction ;

- Pendant les travaux : elle assure la protection du sol support et permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins.

- Pendant les travaux : elle assure la protection du sol support et permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins.
- En service : elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai et d'améliorer la portance à long terme de la plateforme.

Viennent ensuite les couches de fondation et de base formant ainsi les couches d'assise. Ces couches d'assise apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges induites par le trafic et répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible.

Enfin, la couche de surface se compose de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise. Elle a deux fonctions; elle assure d'une part la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau. D'autre part, elle confère aux usagers un confort de conduite d'autant plus satisfaisant que les caractéristiques de la surface sont bonnes.

I.4. Différents types de structures de chaussée

Une présentation sommaire des principales structures types est donnée dans le **Tableau I-1**. Pour chaque type de structure, des exemples sont donnés dans le guide technique sur la conception et le dimensionnement des structures de chaussée, ainsi que dans le catalogue des structures types de chaussées neuves. (CTTP, 2001)

Outre les principales structures types de chaussée présentées au **Tableau I-1**, on trouve les chaussées à structure composite. Elles sont récentes (début des années 1990), innovantes et offrent un bon compromis entre qualité technique et économie en combinant la durabilité des bétons de ciment avec la souplesse et la capacité d'adaptation des matériaux bitumineux. Deux types de structures sont proposés : le béton de ciment mince collé, qui représente une technique d'entretien superficiel des structures bitumineuses, et le béton armé continu sur une couche bitumineuse de type grave bitume.

La conception d'une structure de chaussée passe par un problème d'optimisation technique et économique dont la recette diffère suivant le pays. On présente dans le paragraphe suivant des méthodes de dimensionnement de structures de chaussée adoptées dans trois pays : France, Etats-Unis et en Algérie.

Tableau I-1: Principales structures types de chaussée

Structures types	Nature des couches		
	Surface	Base	Fondation
Souples	Bitumineuse	Graves Non Traitées (GNT)	
Bitumineuses épaisses	Matériaux bitumineux		
Semi-rigides	Bitumineuse	MTLH	
Rigides	Béton de ciment (150 à 400 mm d'épaisseur)		- soit en MTLH - soit en GNT - soit bitumineuse
Mixtes	Matériaux bitumineux		MTLH
Inverses	Bitumineuse	GNT	MTLH

I.5. Dimensionnement de la structure de chaussée

Sous l'effet des sollicitations externes (environnementales, conditions de chargement, etc.), les structures de chaussées sont soumises à des phénomènes complexes (mécaniques, thermiques, physiques et chimiques) qui apparaissent souvent de manière couplée.

Devant la complexité des problèmes observés, les méthodes de dimensionnement développées sont basées sur des règles empiriques tirées de l'observation du comportement en service des structures de chaussée ou de sections expérimentales. Ces méthodes présentent des limites qui sont d'autant plus visibles que de nouveaux types de structures et des matériaux plus performants se développent et que le trafic est en constante augmentation. Un développement de méthodes de dimensionnement plus rationnelles apparaît donc nécessaire, on cite les méthodes les plus connues.

I.5.1. La méthode française de dimensionnement des chaussées

Les fondements de la méthode française de dimensionnement des chaussées ont été dégagés dès le début des années 1970. Dans la démarche adoptée, la détermination des épaisseurs des différentes couches de chaussée ainsi que leurs caractéristiques mécaniques des matériaux relève, soit d'une approche expérimentale empirique, soit de calculs de vérification (méthode rationnelle). Par opposition aux modèles empiriques, ces méthodes rationnelles font appel à l'utilisation combinée de modèles mécaniques et de données expérimentales. C'est par

le biais de modèles de calculs qu'est vérifié le dimensionnement de la structure vis-à-vis des critères de durabilité.

D'un point de vue mécanique, la démarche de la méthode française de dimensionnement peut être scindée en deux étapes. Dans une première étape, il convient de calculer, sous l'effet de l'essieu standard de référence de 130 kN (Tableau I-2), la réponse d'une structure de chaussée choisie à priori (type de structure, matériaux et épaisseurs des couches constitutives). Ce calcul repose sur l'évaluation, sous l'effet d'une charge circulaire appliquée à la surface d'un massif multicouche, les champs de contraintes maximales dans les couches de matériaux et de sol. Dans ce calcul, la charge appliquée symbolise l'action de l'essieu de référence, et le modèle semi-analytique de Burmister, développé aux Etats-Unis à partir de 1943 est utilisé pour obtenir la réponse mécanique.

Dans ce modèle de Burmister, l'interface entre deux couches de matériaux peut être modélisée comme parfaitement collée (aucun déplacement tangentiel relatif entre ces couches n'est admis) ou glissante (les déplacements tangentiels relatifs entre ces couches ne sont pas empêchés). Dans une seconde étape, il s'agit de calculer les valeurs de sollicitations admissibles des matériaux de la structure, en fonction de leur localisation dans la structure, de leurs modes de dégradation (rupture par fatigue des couches en matériaux liés et orniérage du sol et des couches en matériaux non liés), et du trafic cumulé (nombre de poids lourds) devant circuler sur la chaussée pendant sa durée de vie sur une plate-forme donnée (Tableau I-3). La structure convient si les sollicitations induites par le passage de l'essieu de référence restent inférieures ou égales aux sollicitations admissibles pour chaque couche (Tableau I-3). Le choix de la structure finale se fait par calculs itératifs.

Le calcul des valeurs admissibles s'appuie sur le comportement en fatigue des matériaux liés, traduisant la rupture d'une éprouvette en laboratoire pour l'application d'un grand nombre de cycles de sollicitations, et sur le caractère plastique des matériaux non liés, expliquant l'apparition de déformation permanente.

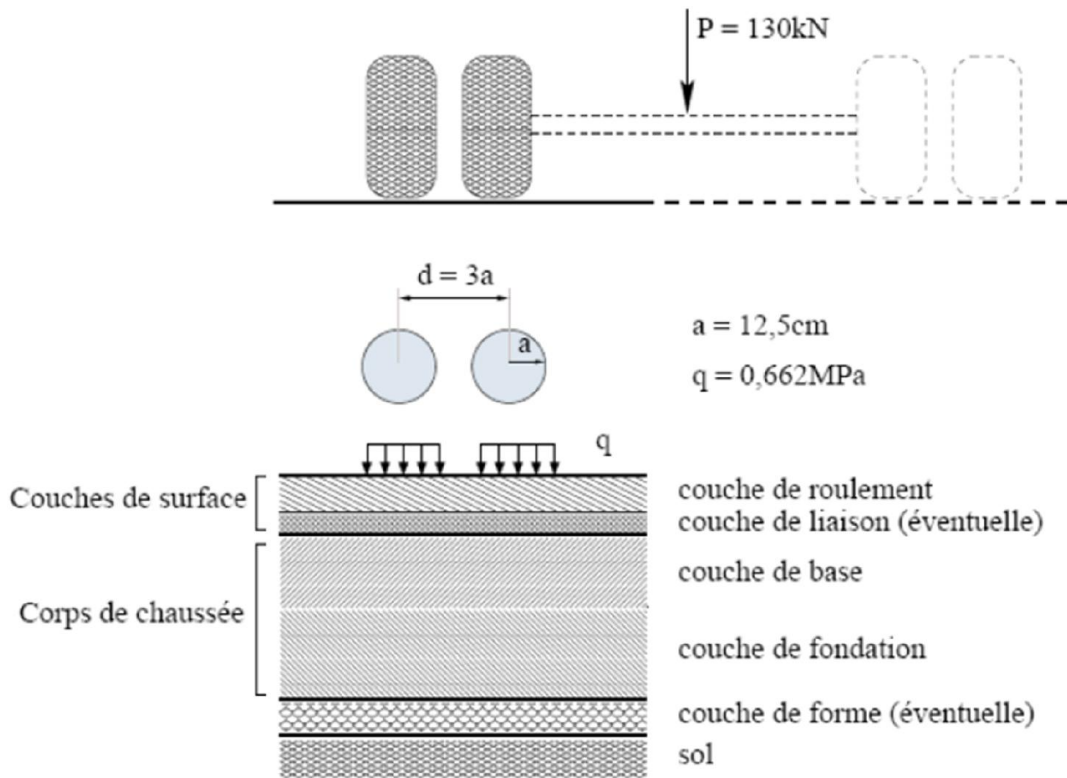


Figure I-2: Massif multicouche et charge de référence (LCPC-SETRA, 1994)

I.5.2. La méthode américaine de dimensionnement [AASHTO]

La méthode américaine de dimensionnement des chaussées AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) est basée sur une analyse empirique des résultats des essais de l'AASHTO Road test réalisés à la fin des années 1950 sur plus de 500 sections tests de chaussées.

Dans la version de 1993, aussi bien pour les chaussées souples que rigides, le dimensionnement se fait à l'aide d'équations de régression traduites sous forme d'abaques et de formules permettant de choisir l'épaisseur de la chaussée en fonction du trafic cumulé considéré et la dégradation de la qualité d'usage de la route. La notion de qualité d'usage de la route est définie par l'indice PSI (Present Serviceability Index) qui varie de zéro (chaussée impossible à circuler) à six (chaussée en parfait état). Cette échelle a été déterminée sur la base des dégradations de la chaussée et de leurs effets perçus par les usagers. Les données de trafic sont converties en nombre cumulé d'essieux standards W (Tableau I-2). Enfin, pour une structure de chaussée choisie, un nombre structurel SN (Structural Number) est calculé et comparé à sa valeur minimale. Cette valeur minimale correspond à la somme pondérée des

épaisseurs des différentes couches, et tient compte de la nature des matériaux et des conditions de drainage de chaque couche.

I.5.3. La méthode algérienne de dimensionnement

I.5.3.1. Détermination du type de réseau

Les études initiées par les services du Ministère des Travaux Publics ont abouti en 1996 à la décomposition du réseau routier national de l'Algérie comme suit:

- Le réseau principal noté RP
- Le réseau secondaire noté RS

Mais seul le réseau principal RP est pris en considération dans le catalogue Algérien, ce réseau principal se décompose en deux niveaux: RP1, RP2.

a) Réseau principal 1 (RP1):

Il comporte des:

- liaisons supportant un trafic supérieur à 1500 véhicules/jour
- liaisons reliant deux chefs lieu de Wilaya
- liaisons présentant un intérêt économique et/ou stratégique

Il s'agit essentiellement d'un réseau composé de routes nationales (RN).

b) Réseau principal 2 (RP2):

Il est constitué de liaisons supportant un trafic inférieur à 1500 véhicules /jours

Ce réseau est composé de routes nationales (RN), de Chemins de Wilaya (CW) et de liaisons reliant l'Algérie aux pays riverains.

I.5.3.2. Les données d'entrées du dimensionnement

Les données de base pour dimensionnement des structures de chaussées sont:

1- la durée de vie: est en étroite relation avec la stratégie d'investissement retenue par le maître de l'ouvrage, elles correspondent à un investissement initial moyen à élever et des durées de vie allant de 15 à 25 ans en fonction du niveau de réseau principal considéré.

2- Le risque de calcul:

La probabilité d'apparition de dégradation avant une période donnée de x années soit inférieure à une valeur fixée

3- les données climatiques (Figure I-3)

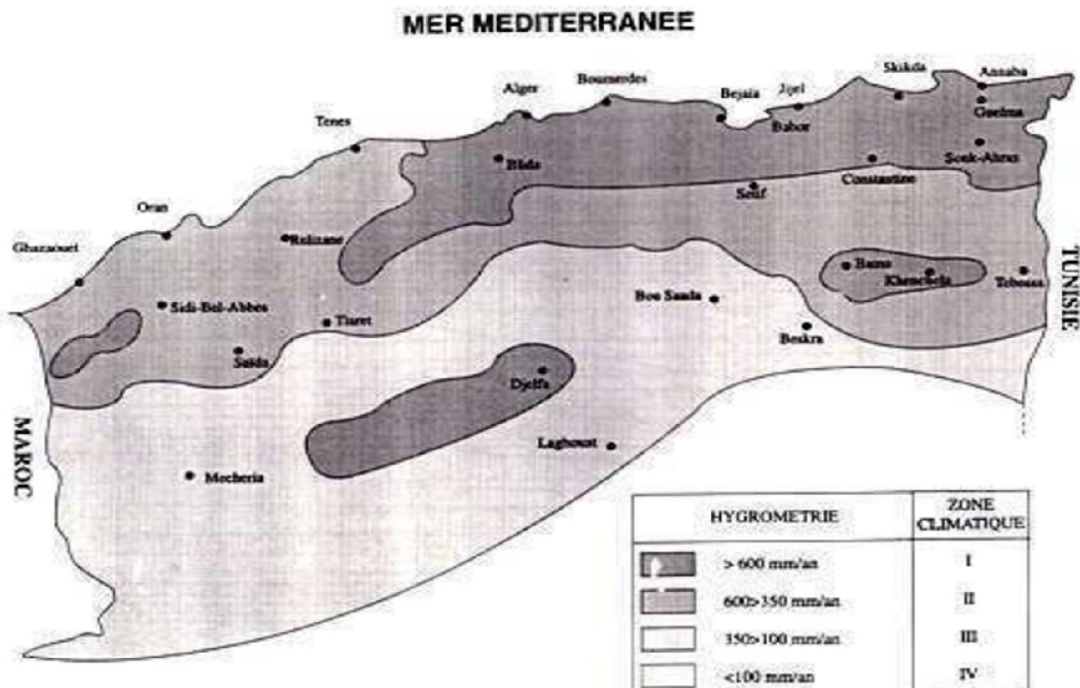


Figure I-3: Zones climatiques en Algérie

4- le trafic

Le poids lourds des véhicules est transmis à la chaussée sous forme de pression

Classe de trafic

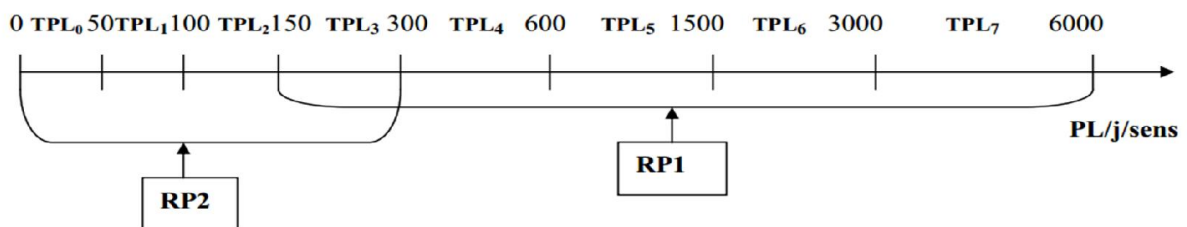


Figure I-4: Classes du trafic poids lourd

5- Le sol support

6- Les caractéristiques des matériaux

Tableau I-2: Méthodes de dimensionnement : types d'essieu standard et performance du support

Méthode	Française LCPC/SETRA	Américaine AASHTO	Anglaise DMRB	Hollandaise	Shell SPDM	Européenne 95/53/CE
Trafic : essieu standard	Essieu simple à roues jumelées de 130 kN	Essieu simple à roues jumelées de 18 kip (82 kN)	Essieu simple à roues jumelées de 80 kN	Essieu simple à roues jumelées de 100 kN	Essieu simple à roues jumelées de 80 kN	Essieu simple à roues jumelées de 110 kN
Performance de la plate-forme	3 niveaux : PF2 (50 MPa), PF3 (120 MPa), PF4 (200 MPa)	Valeur du module élastique entre 1 et 40 kpsi (7-276 MPa)	CBR _{min} =15%	3 niveaux : 50 MPa, 100 MPa, ou 150 MPa	Non disponible	Non disponible

Tableau I-3: Méthodes de dimensionnement : performance mécanique des couches de chaussée

Méthode	Lois de fatigue – Critères dimensionnants	Paramètres
Française [LCPC/SETRA]	Rupture par fatigue des matériaux liés : $\varepsilon_t \leq \varepsilon_6(\theta_{eq}, f) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \cdot k_r \cdot k_s \cdot k_c$	ε_t : déformation horizontale à la base de la couche ; $\varepsilon_6(\theta_{eq}, f)$: déformation à appliquer pour provoquer une rupture du matériau à 10 ⁶ cycles ;
	Déformation permanente des couches en matériaux non liés : $\varepsilon_z \leq A \cdot (NE)^{-0,222}$	NE : Nombre équivalent d'essieux standard ; ki: coefficients de risque de calcul et de calage ; A : égale à 0,016 pour les faibles trafics et 0,012 dans le cas contraire.
Américaine [AASHTO]	$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0,20$ $+ \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log_{10}(M_r) - 8,07$	W ₁₈ : nombre équivalent d'essieux standard ; Z _R *S ₀ : facteur de fiabilité ; SN : nombre structurel ; M _r : module élastique de la plate-forme. ; ΔPSI : variation de l'indice de qualité de la route

I.6. Définition de l'endommagement par fatigue

L'endommagement par fatigue d'un solide est, par définition, l'altération progressive de ses propriétés physiques et mécaniques pouvant conduire à sa rupture suite à l'application d'une sollicitation répétée. Ce phénomène est quantifié le plus souvent par la mesure de la longueur de la fissure amorcée et qui se propage.

Deux niveaux d'échelles de mesure sont utilisés :

- Les fissures microscopiques pour traduire un dommage à l'échelle microscopique
- Les fissures macroscopiques pour le dommage à l'échelle macroscopique.

L'endommagement des matériaux par fatigue provient du caractère cyclique des sollicitations qui leur sont appliquées. Ce dommage peut conduire à la ruine du composant ou de la structure lorsque son accumulation atteint une valeur critique qui est fonction du matériau.

L'objectif d'une loi d'endommagement en fatigue est de fournir un outil de prévision de durée de vie pour tout composant mécanique soumis à des sollicitations variables.

Loi de Miner (accumulation des endommagements):

Miner est pratiquement le premier auteur ayant donné une formulation mathématique d'une loi d'endommagement en fatigue. Les hypothèses de base de sa loi, qui date de 1945, sont les suivantes :

Hyp.1 : le chargement est une fonction sinusoïdale du temps,

Hyp.2 : c'est la totalité du travail absorbé par le matériau qui engendre sa rupture par fatigue,

Hyp.3 : le diagramme de Goodman modifié est la modélisation du diagramme de Haigh qui représente le plus fidèlement le comportement expérimental des matériaux,

Hyp.4 : l'amorçage d'une fissure macroscopique est l'indicateur de la ruine du matériau.

Miner choisit, pour établir le dommage D_i du matériau après application de n_i cycles identiques, la fraction du travail total absorbé par le matériau.

$$D_i = \frac{u_i}{W} = \frac{n_i}{N_{ri}}$$

u_i est l'énergie absorbée par le matériau (transmise par n_i cycles),

W est le travail total absorbé par le matériau à la ruine par fatigue,

N_{ri} est le nombre de cycles considérés à la ruine.

Ce concept conduit à une sommation linéaire des fractions de durée de vie $r_i = n_i/N_i$ propres à chaque type de cycles appliqués :

$$D = \sum_{i=1}^p \frac{n_i}{N_{ri}} = \sum_{i=1}^p r_i$$

La ruine du matériau se produit quand la somme D vaut l'unité. Il s'ensuit l'expression suivante de la fraction de vie résiduelle r_p au niveau p, après application de p-1 blocs de cycles de contrainte :

$$r_p = \frac{n_p}{N_{rp}} = 1 - \sum_{i=1}^{p-1} r_i$$

D'où : n_p et N_{rp} sont respectivement le nombre de cycles appliqués au niveau p et le nombre de cycles à la ruine par fatigue du matériau sous ce type de chargement.

I.7. Mode de fonctionnement de la chaussée :

Le passage d'un véhicule engendre des contraintes de traction et de compression dans les différentes directions des couches d'une chaussée souple (Figure I-5). Chaque couche de la chaussée est assimilée à une poutre qui subit des flexions sous l'effet du trafic.

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent induire des déformations permanentes qui, si elles sont importantes, se traduisent par un orniérage à la surface de la chaussée. Les tractions répétées à la base des couches d'une chaussée, sous l'effet du passage des véhicules, engendrent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau par fatigue.

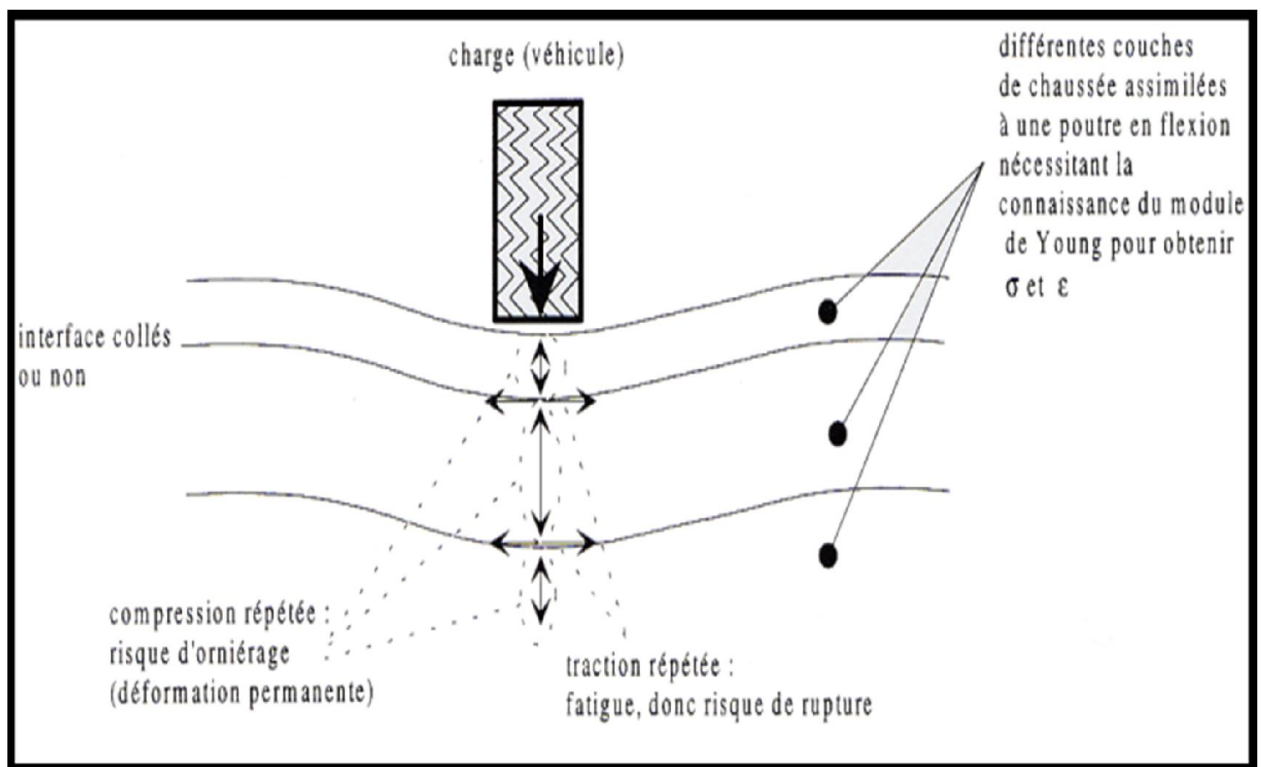


Figure I-5: Fonctionnement de la chaussée bitumineuse

Ces deux endommagements sont les plus communément rattachés aux calculs des structures de chaussées bitumineuses

I.7.1. Notion de trafic équivalent

Le trafic journalier est une combinaison de plusieurs types de véhicules (Léger, utilitaires, poids lourds), et chaque type applique une charge verticale sur la chaussée routière, donc engendre un endommagement. Ces endommagements lorsqu'ils sont accumulés se transforment en fissurations à la base des couches traitées au bitume et conduisent parfois à la rupture.

L'estimation de ces endommagements passe par l'évaluation de l'endommagement de chaque type de véhicule par rapport à une valeur référence qu'on appelle « essieu simple équivalent », c'est-à-dire transformer toutes les charges des véhicules à des essieux simples équivalent (13 t selon le catalogue algérien du dimensionnement des chaussée neuves), ce qui donne un trafic équivalent.

On a la participation à l'endommagement de l'essieu de charge P_i est explicité par α_i donnée par la relation suivante : $\alpha_i = ([P_i/P_0])^\beta$, tel que :

α_i : endommagement engendré par un essieu i

β : coefficient dépend du type de chaussée :

{	$\beta = 4$ pour les chaussées souples
	$\beta = 12$ pour les chaussées rigides

(Pour $P_i = P_0 = 13 \text{ t}$ $\alpha = 1$)

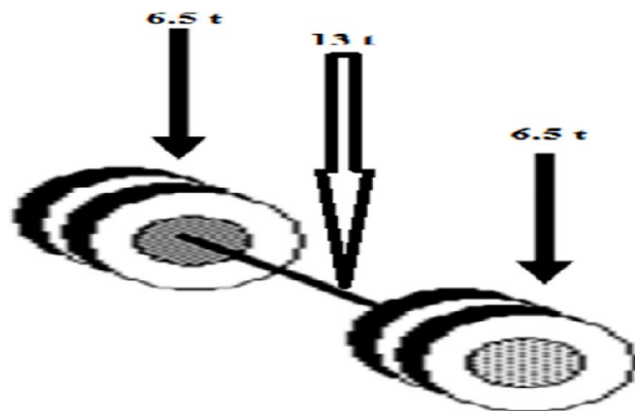


Figure I-6: essieu simple équivalent de 13t

I.7.2. Courbe de Wöhler :

La courbe de Wöhler exprime la loi de fatigue d'un matériau .Elle est explicité par une courbe représentative de l'amplitude des sollicitations appliquées de manière cyclique aux éprouvettes du matériau sollicité en déplacement ou force imposée de même amplitude en fonction du nombre de cycles à la rupture appelé aussi durée de vie Nf pour un niveau de sollicitation donnée. L'équation de cette courbe est la loi de fatigue du matériau. On évalue ensuite le nombre de cycles engendrant la rupture. Cette loi de fatigue est exprimée en termes des déformations pour les matériaux bitumineux et elle se présente comme suit:

$$\log(Nf) = A \cdot \log(\epsilon) + B \quad \text{ou} \quad (\epsilon/\epsilon_6) = ([Nf / [10]^6])^{1/A}$$

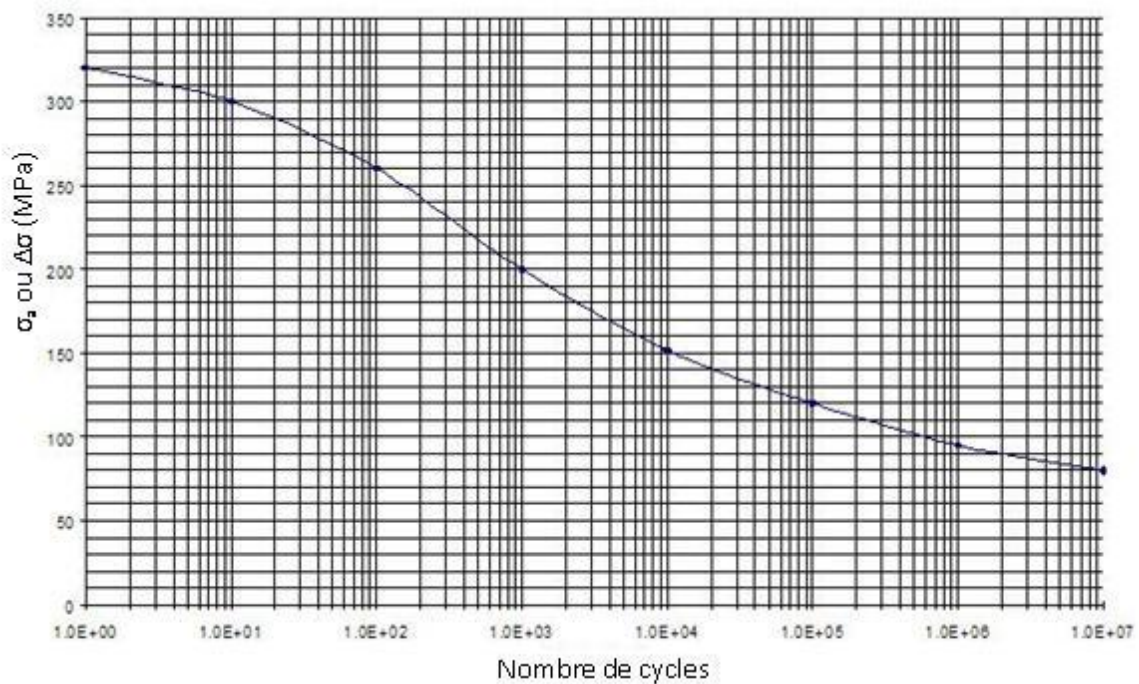


Figure I-7: Courbe de Wöhler (fr.wikipedia.org)

CHAPITRE II :
FONCTIONNEMENT DE LA
CHAUSSEE AU NIVEAU DES
GIRATOIRES

Chapitre II. Fonctionnement de la chaussée au niveau des giratoires

II.1. Introduction :

Les matériaux de chaussée sont soumis à des sollicitations de courte durée à chaque passage d'essieu de véhicule. Des contraintes de traction apparaissent alors à la base de la chaussée et sont répétées à chaque passage de roues. Chaque couche de la chaussée peut être assimilée simplement à une plaque qui subit des efforts de flexions et de cisaillement sous l'effet du trafic. Ces charges ne provoquent pas immédiatement la rupture, mais leur répétition peut aboutir à terme, à une fissuration par fatigue.

Il est bien connu que les charges réelles qui s'appliquent sur la chaussée en giratoire sont supérieures aux charges limites réglementaires. Elles sont dues aux effets dynamiques qui apparaissent lorsque le véhicule est en mouvement dans les sections courbes. Sous l'action des efforts appliqués par le véhicule (charges, couple de freinage, etc.), le pneu se déforme et établit avec le revêtement une aire de contact (Figure II-1). Les déformations engendrées et les propriétés d'adhérence de l'aire de contact entraînent des forces de réaction qui influent sur le comportement du véhicule (Berthier, 1991).

Ce qu'on a donc, dans un carrefour giratoire (et même pour les sections à sinuosité forte et les petits rayons), on trouve deux sollicitations dues à :

- 1) La charge verticale de l'essieu arrière du poids lourds qui sera antisymétrique par rapport à l'axe de l'essieu (on va le démontrer après).
- 2) La force centrifuge qui s'applique sur la surface du contact roue-chaussée.

Ce qui fait que la chaussée en ces sections particulières est sévèrement sollicitée et se dégrade plus rapidement que la chaussée en sections droites (Figure II-2).

II.2. Equilibre mécanique dans un giratoire :

Le carrefour giratoire est un aménagement à réaliser aux intersections de voies. Il est destiné à assurer à la fois la gestion des conflits, la fluidité du trafic et la sécurité des usagers.

Une supposition raisonnable d'une répartition uniforme des pressions normales et des pressions tangentielles d'un demi-essieu, engendrées par des courbures du giratoire est considérée.

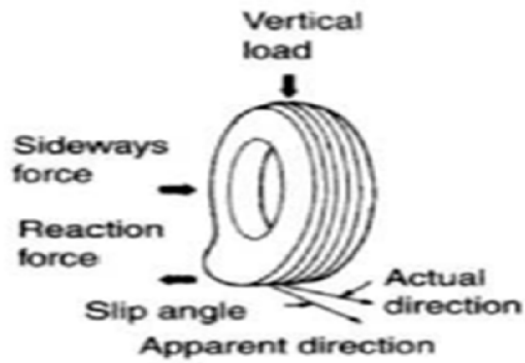


Figure II-1: déformation d'un pneu au niveau de carrefour giratoire



Figure II-2: Dégradations prématurés au niveau des giratoires

La force centrifuge c'est la force qui, dans un virage, entraîne le véhicule vers l'extérieur de la courbe.

$$F=(M.V^2)/R$$

Elle est proportionnelle :

- Au carré de la vitesse (V^2)
- À l'inverse du rayon du virage (R)
- À la masse du véhicule (M)



Figure II-3: dérapage d'un poids lourd au niveau d'une section courbe

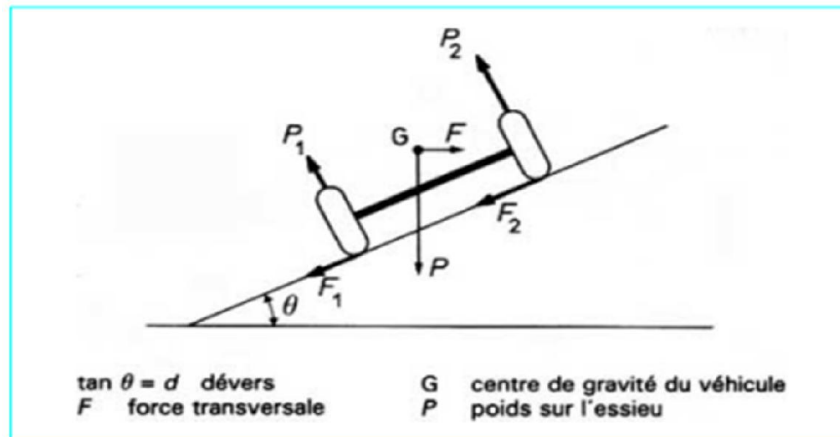


Figure II-4: Équilibre d'un essieu sous l'action d'une force transversale

Si l'essieu chargé d'un effort vertical P , est sollicité par une force centrifuge F , dans un carrefour giratoire de rayon R et de dévers $d = \tan \theta$; et si toutes ses roues sont sollicitées de la même façon l'équilibre des forces permet d'écrire les équations suivantes :

- v : vitesse du véhicule
- R : rayon du carrefour giratoire
- M : masse de l'essieu en mouvement ($P = M \cdot g$)
- P_1, P_2 : la charge instantanée de la roue
- F_1, F_2 : la sollicitation transversale
- F : force centrifuge ($F = MV^2/R$)
- θ : angle de dévers du giratoire
- $K\alpha$: coefficient de frottement transversal du pneu sur la chaussée

Equilibre suivant l'axe Z :

$$P_1 + P_2 = P \cos \theta + F \sin \theta$$

Equilibre suivant l'axe X :

$$F_1 + F_2 = F \cos \theta - P \sin \theta$$

Si θ est petit :

$$P_1 + P_2 = P + Fd$$

$$F_1 + F_2 = F - Pd$$

Equilibre en rotation de l'essieu :

$$\frac{1}{2} * x * (P_2 - P_1) = hG * (F + Pd)$$

hG est la hauteur du centre de gravité du poids lourd

On trouve :

$$P_2 = \frac{1}{2} * (P - Fd) + (hG) / x * (F + Pd)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} * (P - Fd) - (hG) / x * (F + Pd)$$

Dans le domaine des petits angles d'enivrage, on peut écrire, comme on l'a vu :

$$F_1 + F_2 = K\alpha (P_1 + P_2)$$

$$F - Pd = K\alpha (P + F.d)$$

Si M est la masse du véhicule, s'il se déplace à la vitesse v sur une courbe de rayon R et si ses quatre roues sont sollicitées et se comportent de façon identique :

$$MV^2/R - Mgd = K\alpha (Mg + MV^2/Rd)$$

Non glissement de la roue gauche :

$$F_1 = K\alpha . P_1$$

Non glissement de la roue droite :

$$F_2 = K\alpha . P_2$$

$$F_2 > F_1 \text{ et } P_2 > P_1$$

D'où la dissymétrie des charges à l'essieu.

II.3. Influence de type d'interface sur le fonctionnement de la chaussée

II.3.1. Interface

L'interface est la frontière, réelle ou fictive, qui sépare deux éléments.

II.3.2. Interfaces entre couches de chaussée

Dans la structure de chaussée, par interface entre couches de chaussée, on définit la zone de contact entre deux couches de matériaux.

II.3.3. Fonctionnement de l'interface

Pour la plupart des types de structures utilisés dans le domaine routier, leur succès est essentiellement lié à l'hypothèse qu'un bon collage assuré à l'interface de certaines couches de matériaux. À titre d'exemple, pour une chaussée bitumineuse épaisse, la réalisation en plusieurs couches implique le collage à chaque interface. De même, pour les chaussées à structures composites, leur succès est conditionné par le collage entre la couche de béton de ciment et la couche bitumineuse.

En effet, d'un point de vue fonctionnement mécanique de la chaussée, l'état de l'interface conditionne la répartition des contraintes et des déformations dans chaque couche de la structure. Tant que les différentes couches de matériaux restent collées entre elles, la structure de chaussée se comporte comme un bloc monolithique et, par rapport à une structure à couches décollées, la rigidité globale est augmentée et les sollicitations (contraintes, déformations) au sein des matériaux sont réduites. Lors du dimensionnement de la chaussée, les épaisseurs des couches (et par conséquent le coût de la chaussée) dépendent, en partie, de la rigidité de la structure.

Sur chantier, lorsque le niveau de collage à l'interface est insuffisant (comparé à celui supposé lors du dimensionnement), les capacités individuelles de chaque couche de matériau peuvent être dépassées, accélérant ainsi la dégradation de la couche.

II.3.4. Décollement des couches de revêtements des chaussées

Le décollement des couches de chaussée a lieu de plusieurs chemins :

Lors de la réalisation : des erreurs lors de la réalisation des couches et les interfaces (absence des couches d'accrochage, présence d'eau...) conduisent au décollement des couches.

Après la réalisation et la mise en service : à cause de chargement au niveau des sections courbes et les carrefours giratoires, une contrainte tangentielle provoque une dégradation au niveau de l'interface Roulement/Base.

La méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées est basée d'une part, sur des critères de comportement en fatigue des produits hydrocarbonés et, d'autre part, sur des critères d'orniérage des couches non liées. Elle considère un collage parfait des couches bitumineuses entre elles pendant toute la durée de vie de la structure.

L'utilisation des couches d'accrochage lors de la réalisation des structures routières est une technique courante pour assurer le collage des couches de chaussée. Ces couches, ou films d'émulsion bitumineuse, sont de légers enduits de bitume pur ou modifié. Elles sont essentiellement soumises à des sollicitations de cisaillement cyclique alterné dues au trafic routier. Ces sollicitations sont particulièrement importantes dans les tronçons de chaussée à fortes sollicitations horizontales (zones de freinage-accélération, pentes, virages, parkings).

Il est reconnu que les conditions de collage à l'interface entre les couches de chaussées modifient la distribution des contraintes et des déformations dans une chaussée souple ou semi-rigide et influencent la résistance à la fatigue du revêtement sous chargement cyclique.

Une mauvaise adhésion entre les couches peut mener à la dégradation prématurée de la chaussée et à l'apparition de fissures longitudinales de fatigue en traces des roues, de faïençage, des pelades, des nids-de poule, etc.

II.3.5. Etat des interfaces au niveau des carrefours giratoires

Lorsqu'un véhicule lourd circule au niveau d'un carrefour giratoire et à cause de la force centrifuge, il résulte une contrainte de cisaillement au niveau de la couche de roulement et l'interface entre la couche de roulement et la couche de base. La contrainte de cisaillement provoque un décollement entre les deux couches.

II.3.6. Influence de l'état de l'interface sur la distribution des déformations

On prend l'exemple d'une structure de Catalogue Algérien de dimensionnement des chaussées neuves (6BB/15GB/35GNT/S2) sous un trafic de classe TPL5 et on analyse le comportement de cette structure calculée pour un trafic donné pour laquelle les déformations

de traction admissibles sont calculées, selon le type d'interface (roulement-base) considéré ; collée, semi collée, décollée ou glissante

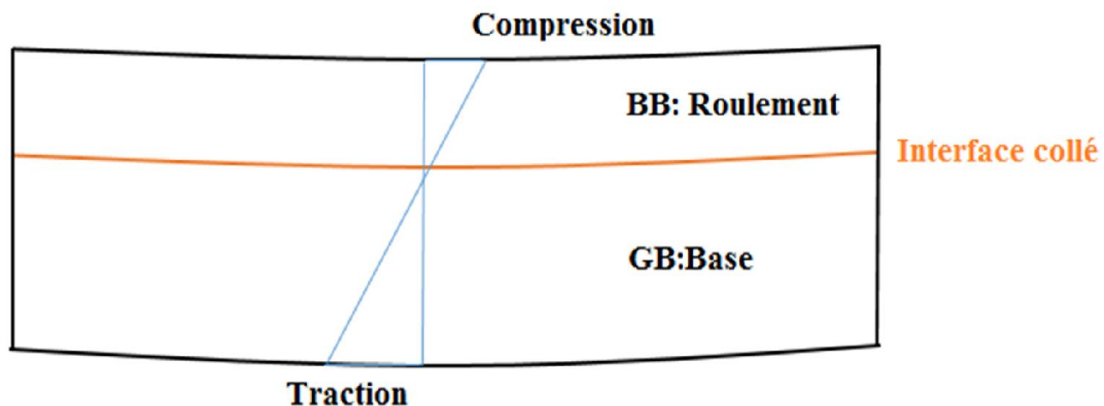
Interface collée :

	niveau calcul	EpsilonT horizontale	SigmaT horizontale	EpsilonZ verticale	SigmaZ verticale
----- surface (z=0.000) -----					
h= 0.060 m	0.000m	71.9	0.544	-21.8	0.659
E= 4000.0 MPa					
nu= 0.350	0.060m	33.8	0.385	46.2	0.585
----- collé (z=0.060m) -----					
h= 0.150 m	0.060m	33.8	0.658	7.1	0.585
E= 7000.0 MPa					
nu= 0.350	0.210m	-117.9	-1.110	111.4	0.064
----- collé (z=0.210m) -----					
h= 0.150 m	0.210m	-117.9	-0.025	236.8	0.064
E= 312.0 MPa					
nu= 0.250	0.360m	-152.4	-0.050	177.9	0.033
----- collé (z=0.360m) -----					
h= 0.200 m	0.360m	-152.4	-0.013	309.2	0.033
E= 125.0 MPa					
nu= 0.250	0.560m	-159.5	-0.019	229.9	0.019
----- collé (z=0.560m) -----					
h infini	0.560m	-159.5	-0.001	404.3	0.019
E= 50.0 MPa					
nu= 0.350					

- ✦ Déflexion maximale =58.5 mm/100 (entre-jumelage)
- ✦ Rayon de courbure =601.7 m (entre-jumelage)

Figure II-5: Contrainte-Déformation dans la chaussée considérant l'interface BB/GB collée

Le fait que l'interface est collée, la déformation de la traction et est la même au niveau de l'interface BB/GB en haut et en bas, le collage assure une continuation de distribution des déformations.



Interface semi collée :

niveau calcul		EpsilonT horizontale	SigmaT horizontale	EpsilonZ verticale	SigmaZ verticale
----- surface (z=0.000) -----					
h= 0.060 m	0.000m	37.1	0.313	18.0	0.659
E= 4000.0 MPa					
nu= 0.350	0.060m	-42.7	-0.023	140.6	0.632
----- 1/2collé (z=0.060m) -----					
h= 0.150 m	0.060m	66.4	0.853	-38.9	0.632
E= 7000.0 MPa					
nu= 0.350	0.210m	-134.8	-1.273	128.3	0.080
----- collé (z=0.210m) -----					
h= 0.150 m	0.210m	-134.8	-0.026	288.6	0.080
E= 312.0 MPa					
nu= 0.250	0.360m	-180.3	-0.058	209.8	0.039
----- collé (z=0.360m) -----					
h= 0.200 m	0.360m	-180.3	-0.015	366.5	0.039
E= 125.0 MPa					
nu= 0.250	0.560m	-187.4	-0.023	266.6	0.022
----- collé (z=0.560m) -----					
h infini	0.560m	-187.4	-0.002	468.7	0.022
E= 50.0 MPa					
nu= 0.350					

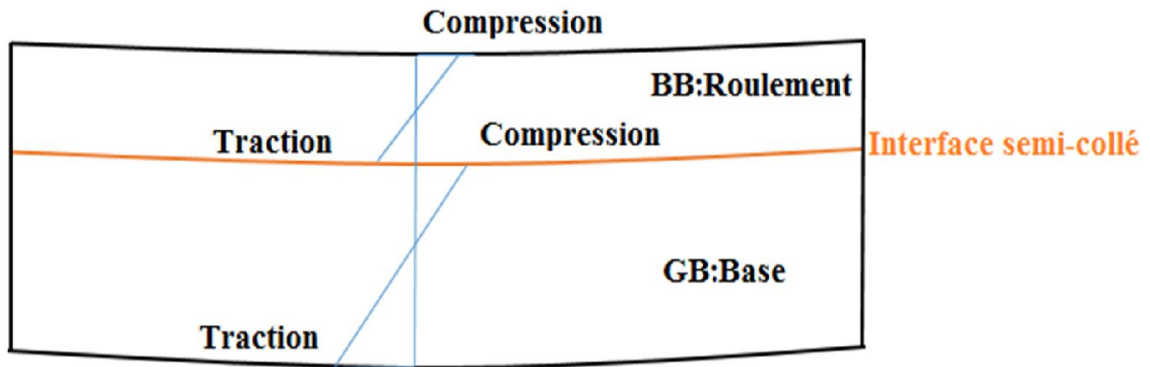
- ✦ Déflexion maximale =63.6 mm/100 (entre-jumelage)
- ✦ Rayon de courbure =484.4 m (entre-jumelage)

Figure II-6:Contrainte-Déformation dans la chaussée considérant l'interface BB/GB semi collée

Dans ce cas, on voit que chaque couche se comporte seule, on remarque que :

- Pour la couche de roulement en BB : elle est sollicitée en compression en haut et en traction en bas (Contrainte de traction à la base de la couche de BB), elle va subir des déformations de traction répétées qui vont finir par la dégrader,
- La déformation de traction augmente à la base de la couche de base (en GB) lorsque l'interface n'est pas parfaitement collée (demi-collée) par rapport à la valeur de déformation enregistrée pour l'état collé.
- La déflexion maximale de la chaussée augmente par rapport à celle enregistrée dans le cas d'interface collé avec aussi une diminution de la valeur de rayon de courbure.
- La déformation verticale sur le sol support a aussi augmenté dans ce cas.

Il est à noter que la couche de roulement n'est pas calculée à la fatigue dans le dimensionnement des chaussées selon le catalogue Algérien.



Interface décollée (glissante):

	niveau calcul	EpsilonT horizontale	SigmaT horizontale	EpsilonZ verticale	SigmaZ verticale
----- surface (z=0.000) -----					
h= 0.060 m	0.000m	2.4	0.082	57.9	0.659
E= 4000.0 MPa					
nu= 0.350	0.060m	-135.1	-0.431	235.0	0.680
----- glissant (z=0.060m) -----					
h= 0.150 m	0.060m	68.4	1.011	-85.0	0.680
E= 7000.0 MPa					
nu= 0.350	0.210m	-151.7	-1.437	145.1	0.096
----- collé (z=0.210m) -----					
h= 0.150 m	0.210m	-151.7	-0.028	340.3	0.096
E= 312.0 MPa					
nu= 0.250	0.360m	-208.2	-0.067	241.7	0.046
----- collé (z=0.360m) -----					
h= 0.200 m	0.360m	-208.2	-0.018	423.8	0.046
E= 125.0 MPa					
nu= 0.250	0.560m	-215.3	-0.026	303.3	0.025
----- collé (z=0.560m) -----					
h infini	0.560m	-215.3	-0.002	533.1	0.025
E= 50.0 MPa					
nu= 0.350					

- ✦ Déflexion maximale =68.6 mm/100 (entre-jumelage)
- ✦ Rayon de courbure =367.0 m (entre-jumelage)

Figure II-7: Contrainte-Déformation dans la chaussée considérant l'interface décollée

La couche de roulement est sollicitée en traction sur une grande partie de son épaisseur. La déformation de traction est plus importante que le cas de l'interface demi-collée.

La déformation de traction à la base de GB est encore plus importante que dans le cas de l'interface semi collée.

La déflexion maximale de la chaussée augmente avec aussi une diminution de la valeur de rayon de courbure par rapport aux deux cas précédents.

La déformation verticale sur le sol support a augmenté par rapport aux deux cas précédents.

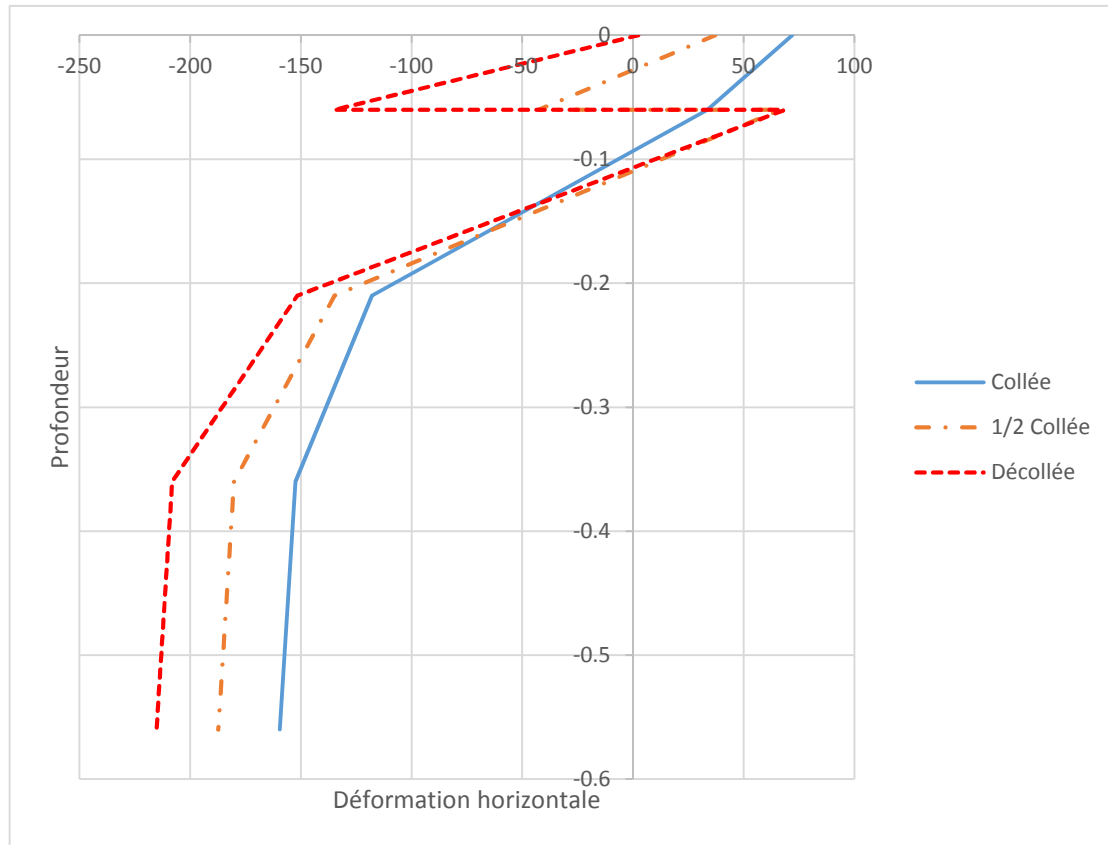


Figure II-8: Variation de la déformation transversale au niveau de l'interface (Roulement/Base)

II.4. Conclusion

La perte de collage au niveau de l'interface roulement/base augmente les déformations de traction au niveau de la couche de roulement qui subit des dommages prématurés (fissures de traction importantes) qui ne sont pas prévues dans le dimensionnement.

On a remarqué aussi l'augmentation de la déflexion et les déformations verticales sur le sol support.

Le collage de l'interface est supprimé par l'effet des sollicitations de cisaillement (freinage, accélération) et cet effet est beaucoup plus important au niveau des giratoires et les sections courbes où vient s'ajouter aux effets de freinage et accélération, les effets de la force centrifuge.

CHAPITRE III :
FATIGUE DES INTERFACES

ENSTB 2015

Chapitre III. FATIGUE DES INTERFACES

III.1. Introduction

Les travaux sur l'influence de l'état d'interface visent à une meilleure connaissance du comportement mécanique des couches d'accrochage mises en œuvre à l'interface de deux couches d'enrobés bitumineux (DIAKHATE, 2007).

Ce chapitre est une étude bibliographique concernant l'influence et la fatigue des interfaces sur le comportement mécanique de la chaussée bitumineuse.

Afin de caractériser ce comportement, un large travail expérimental a été réalisé. Les résultats d'essais ont permis d'alimenter le modèle éléments finis développé dans le but de prédire la durabilité du collage à l'interface des couches de chaussée. Ce modèle permet également d'étudier l'effet de la modélisation ou non du comportement de l'interface sur le dimensionnement de la chaussée.

III.2. Essais de caractérisation de l'état d'interface

Il existe des essais qui permettent de qualifier et/ou de quantifier le niveau de collage à l'interface de deux couches de chaussée réalisées en matériaux bitumineux. On classe ces essais en deux familles selon que la méthode d'essai présente un caractère destructif ou non destructif. Une analyse de ces différentes méthodes d'essais servira de base pour la mise au point d'une méthodologie de suivi de l'état de l'interface.

III.2.1. Caractérisation de l'état de l'interface par Contrôle Non Destructif

Se fait en se basant sur un ensemble d'essais appliqués à l'auscultation des chaussées, et plus particulièrement à la caractérisation de l'état interface entre deux couches de matériaux bitumineux. vis-à-vis de la détection des défauts structurels. Le processus de diagnostic comprend le relevé des dégradations de surfaces, la mesure de la déformabilité de surface (déflexion), etc.

Les informations recueillies peuvent conduire à une présomption de défauts de collage entre couches et complétées à travers d'autres essais de type propagation d'ondes mécaniques, mesure d'impédance mécanique.

L'emploi de méthodes d'auscultation non destructives présente l'avantage de pouvoir qualifier et suivre l'état de l'interface sans pour autant perturber le comportement mécanique du corps de chaussée.

III.2.1.1. Auscultation avec le déflectographe

Utilisé notamment pour la surveillance d'un réseau routier, la détection des zones défectueuses à renforcer (etc.), l'essai au déflectographe est une technique d'auscultation mécanique statique ou quasi statique qui permet de mesurer le déplacement vertical de la surface de la chaussée (déflexion) sous l'effet d'un essieu d'un poids lourd en mouvement à vitesse constante. Le principe de l'essai fait intervenir une poutre de référence désolidarisée du véhicule, et qui repose sur la chaussée par trois points situés hors de la zone d'influence de la charge de 13 tonnes. Le véhicule avançant, les capteurs de la poutre mesurent les valeurs de déflexion jusqu'au passage de l'essieu arrière. La poutre est ensuite ramenée à l'avant, dans sa position initiale vis-à-vis du véhicule, pour une nouvelle mesure.

La forme et l'amplitude du bassin de déflexion renseignent sur la capacité et la condition structurale du corps de chaussée. Les valeurs de déflexion et du rayon de courbure du bassin sont influencées par les caractéristiques (modules élastiques et épaisseurs) des différentes couches de la structure de chaussée et les niveaux de collage aux interfaces. En effet, lorsque le niveau de collage à l'interface diminue, la déflexion augmente et le rayon de courbure diminue.



Figure III-1: Mesure de déplacement vertical par le déflectographe

III.2.1.2. Auscultation avec le Falling Weight Deflectometer (FWD)

Tout comme l'essai au déflectomètre présenté dans le paragraphe précédent, l'essai au FWD est une technique d'auscultation mécanique statique ou quasi statique. Le FWD (déflectomètre à masse tombante) est conçu pour mesurer un bassin de déflexion à la différence

que la charge est tombante et appliquée sur une plaque de 300 mm de diamètre. Il se compose d'une remorque tractée de 850 kg environ (transportant les éléments de mise en charge et les capteurs de déplacement) et d'un système de pilotage automatique, d'acquisition et de traitement des données. Le principe de l'essai est le suivant. Suivant le type de structure de chaussée à tester, la masse est libérée d'une hauteur variant de 20 à 400 mm, provoquant une force variant de 7 à 105 kN. La charge est transmise à la chaussée par l'intermédiaire d'un ressort dont la constante de raideur permet de déterminer la durée du chargement. Les neuf capteurs de déplacement (dont un au centre de la plaque) mesurent les valeurs de la déformée horizontale sur 2 mètres environ du point d'application de la charge. (Figure III-2)

Pour les structures routières, les paramètres de chargement sont réglés de manière à obtenir une impulsion d'une durée de 28 ms (34 Hz), correspondant à la durée de charge d'un poids lourd circulant à une vitesse moyenne d'environ 70 km/h.

L'essai au FWD permet alors de renseigner sur la capacité et la condition structurelle de la structure de chaussée. Cependant, les conclusions faites sur l'essai au déflectomètre s'appliquent également à l'essai au FWD. Le niveau de déflexion obtenu est global et dépend aussi bien de l'état de l'interface que de la capacité portante des différentes couches de chaussée. L'état collé ou glissant de l'interface pourrait cependant être vérifié pour une chaussée neuve.

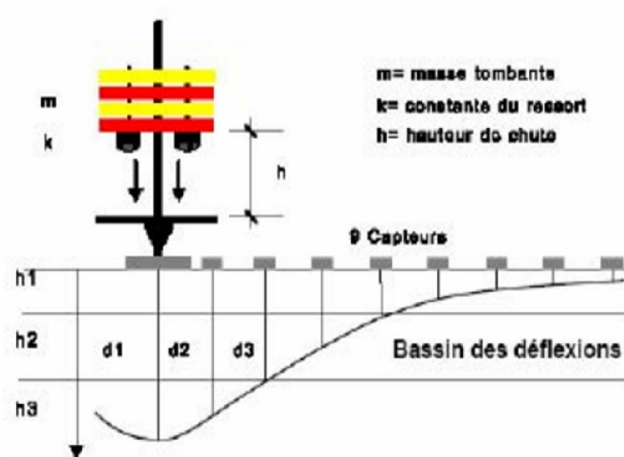


Figure III-2: Appareillage et principe de fonctionnement du FWD (www.infralab.ch)

III.2.1.3. Auscultation avec le Collomètre

Le collomètre a été développé en 1975 pour détecter les couches décollées. Son principe repose sur des constatations pratiques. Lorsque les couches sont collées entre elles, alors suite à un choc donné à la surface de la chaussée, une grande partie de l'énergie est transmise vers

le sol. S'il y a défaut (décollement) à l'interface, l'énergie est réfléchiée vers la surface. Le collographe se compose d'une masse tombante et des géophones qui, placés à 100 mm autour du point d'impact, mesurent la réponse de la structure. Cet appareil est remplacé par le collographe.

III.2.1.4. Auscultation avec le COLIBRI

Appliquée à une structure de chaussée, la technique d'auscultation COLIBRI vise à mesurer la réponse dynamique de la structure suite à une série d'excitations dynamiques par l'intermédiaire d'un marteau instrumenté. La réponse est évaluée par un accéléromètre disposé à 10 cm du marteau.

Dans le domaine fréquentiel, la fonction de transfert entre les signaux de sollicitation et de réponse est caractéristique de l'absence ou de la présence de défaut d'interface. En présence d'un défaut, la fonction de transfert est amplifiée dans une bande de fréquences. Bats-Villard précise que le module des fonctions de transfert est surtout influencé en moyenne fréquence (0,5 à 2 kHz) par l'état de l'interface. La Figure (III-3) présente, en partie, le prototype COLIBRI développé par le LCPC. Elle comprend un marteau instrumenté et un capteur accélérométrique maintenu à la surface de la chaussée par un système masse – ressort.

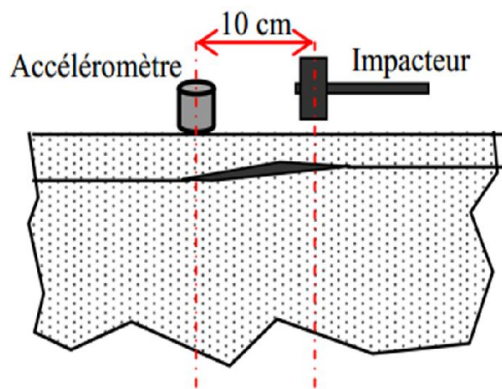


Figure III-3: Principe des méthodes d'auscultation dynamique et prototype COLIBRI du LCPC

III.2.2. Caractérisation de l'état de l'interface par Contrôle Destructif

La connaissance des caractéristiques mécaniques de collage de l'interface associées aux sollicitations appliquées à la structure multicouche permet à l'ingénieur de mieux définir la

répartition des contraintes et déformations dans les couches constitutives et donc de mieux estimer la durabilité de la structure. Cependant, à travers cette aptitude à pouvoir mesurer la performance mécanique du collage à l'interface, ces différents types d'essais présentent un caractère destructif dans la mesure où ils s'appliquent sur des éprouvettes soit prélevées sur chaussée réelle ou expérimentale, soit fabriquées en laboratoire.

(Raab et Partl, 2004) ont proposé un inventaire des sollicitations appliquées à l'interface (Figure III-4). Suivant le type de sollicitation appliqué à l'interface, on rencontre des méthodes d'essais adaptés à des études, soit en laboratoire, soit sur chantier. La plupart de ces méthodes d'essais se limitent à la caractérisation du comportement mécanique de l'interface sous chargement monotone. D'autres essais permettent également d'étudier la durabilité mécanique de ce collage.

La sollicitation de traction peut apparaître suite à un freinage du véhicule. Nous verrons plus loin que la sollicitation de traction a longtemps été adoptée pour tester l'adhérence de certaines couches minces

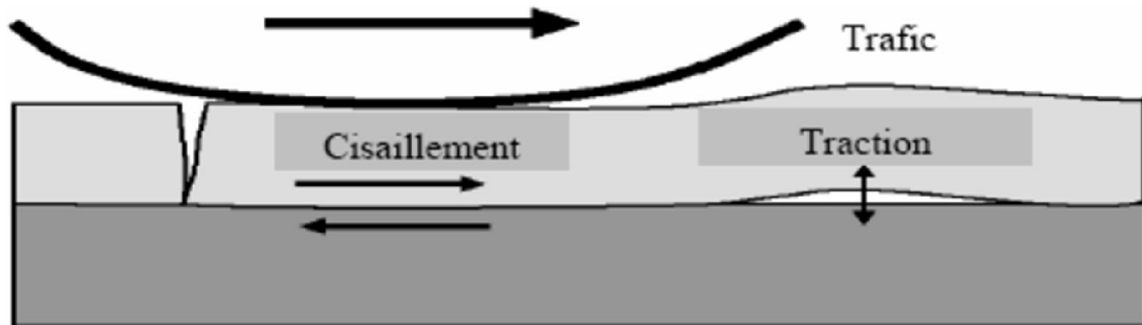


Figure III-4: Modes de sollicitation de l'interface sous conditions de trafic

III.2.2.1. L'essai d'ovalisation

Dans la pratique, le carottage est la méthode d'auscultation la plus simple. Il consiste à prélever un échantillon cylindrique de la structure de chaussée. L'état collé ou glissant de l'interface entre couches peut parfois être détecté visuellement sur la carotte. Cependant, les conditions d'essais (vitesse de rotation et diamètre du carottier), peuvent affecter les résultats en amplifiant le niveau de décollement.

Cet essai permet de :

- Caractériser l'état des interfaces de la chaussée.
- Déterminer la déformation principale maximale au fond d'assise traitée et en bas des couches décollées, engendrée par le passage d'un jumelage standard (actuellement 6.5 t)

Un diamètre de carottier de 150 mm est proposé pour limiter les efforts lors du carottage (KOBISH, 2004). L'essai de carottage peut être valorisé en étant couplé à l'essai d'ovalisation. Imaginé et développé vers les années 1970, par les Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC).

L'essai d'ovalisation (Figure III-5) a pour principe la mesure, dans un trou de carottage, les variations de diamètre à différentes profondeurs au passage d'un jumelage standard (65 kN), et a fait l'objet de la norme NF P 98-203-1. L'état de l'interface est analysé en effectuant deux mesures de part et d'autre de l'interface. Si ces valeurs sont égales, alors l'interface est collée. Des écarts significatifs entre les mesures traduisent un glissement plus ou moins prononcé au niveau de l'interface.

Les valeurs de déformation mesurées au niveau de l'interface peuvent être traduites en termes de niveau de collage. De ce fait, on peut estimer la performance mécanique du collage à l'interface sur une échelle graduée de zéro (interface glissante, valeur maximale de déformation) à un (interface parfaitement collée, valeur minimale de déformation). De plus, dans un outil de calcul de structure, ces valeurs de déformations peuvent être prises en compte et renseigner sur la répartition des contraintes et déformations dans les différentes couches.

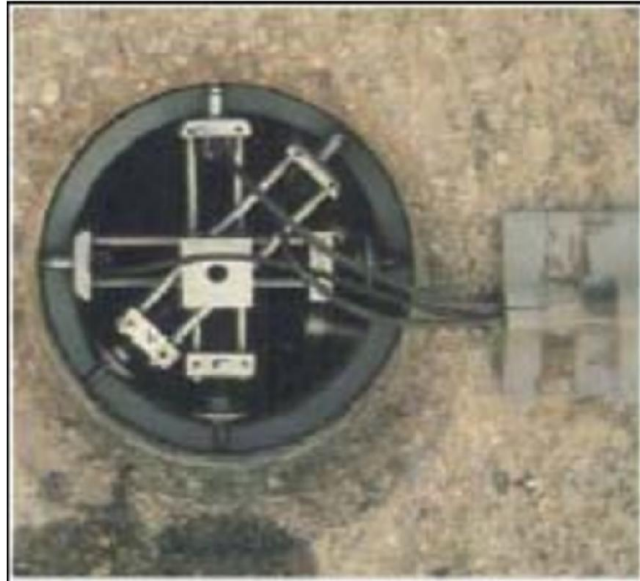


Figure III-5: Dispositif expérimental de l'essai d'ovalisation

III.2.2.2. L'essai de torsion

L'essai de cisaillement par torsion, fut développé par Bruyne et consistait à coller bout à bout deux cylindres de fine épaisseur. Cet essai vise à mesurer la résistance au cisaillement par torsion d'une interface entre deux couches d'enrobés. Le principe de l'essai est de solliciter en torsion une éprouvette bimatériau de manière à générer des contraintes de cisaillement à l'interface.

Ce type d'essai est largement utilisé dans beaucoup de domaines d'ingénierie pour l'évaluation de la performance d'un assemblage collé, mais demeure peu utilisé dans le domaine des chaussées pour l'étude du collage entre couches de chaussée. Cet essai trouve son application aussi bien en laboratoire que sur chantier (Figure III-6).

Sur chantier, l'essai consiste à carotter jusqu'à une profondeur d'environ 10 mm en dessous de l'interface à tester et à appliquer, au moyen d'une clé dynamométrique, une sollicitation monotone de torsion sur un disque préalablement collé à la surface de la carotte. L'essai est réalisé manuellement, et à température ambiante. De ce fait, on ne peut pas garantir une vitesse constante de chargement ; l'essai étant rapide, on suppose que la température reste invariable. Dans le cas d'expertises, le CRM EUROVIA utilise cette méthode d'essai pour quantifier la performance du collage à l'interface.

En laboratoire, un dispositif et une presse mono-axe permettent d'appliquer, via des disques collés aux extrémités d'une éprouvette cylindrique bimatériau, une sollicitation monotone de torsion. L'essai de torsion en laboratoire est utilisé au Royaume Uni, les éprouvettes carottées ont un diamètre de 100 mm. Le CRM EUROVIA utilise également cet essai de laboratoire sur des éprouvettes de diamètre 150 ou 100 mm.



Figure III-6: Essai de torsion : principe d'essai et exemples de dispositifs d'essai (CRM Eurovia)

III.2.2.3. L'essai de traction directe

L'essai de traction est l'un des premiers essais développés pour mesurer la résistance à l'arrachement, sous chargement monotone, des couches d'étanchéité sur les tabliers de ponts.

L'objectif de l'essai est de générer des contraintes de traction à l'interface de deux couches. Il s'agit alors de mettre en traction une éprouvette bicouche, l'interface étant disposé orthogonalement à la direction de l'effort de traction. Ce type d'essai peut être réalisé aussi bien en laboratoire que sur chaussée.

En Autriche, cet essai est normalisé (RVS 11.65 1993). Sur chantier, un carottage est réalisé jusqu'à une profondeur de 50 mm en dessous de l'interface à tester avec un carottier de diamètre 100 mm. Le chargement monotone de traction est appliqué via un casque métallique collé à la surface de l'éprouvette. La contrainte à la rupture doit être supérieure à 1,5 MPa lorsque le bitume utilisé est modifié ou 1 MPa lorsque c'est un bitume pur. Cependant, dans la plupart des cas, l'essai conduit à des résultats dispersés.

Du côté du Québec, un dispositif d'essai de traction directe a été conçu en 1998 dans le cadre d'un partenariat entre le Ministère des Transports du Québec (MTQ) et le Centre de Recherche et de Contrôle Appliqué à la Construction (CRCAC). Des modifications y ont été apportées par la suite par le MTQ. Sur chantier, l'essai de mesure de la force de liaison entre deux couches d'enrobés consiste à effectuer un carottage d'un diamètre de 100 mm, à environ 10 à 20 mm sous l'interface entre la couche de surface et la couche sous-jacente. Un système

de préhension sans colle est placé sur le pourtour de la carotte jusqu'à une profondeur de 35 mm dans la couche de surface. Une contrainte de traction est appliquée à la vitesse de 240 N/s.

III.2.2.4. L'essai de cisaillement direct

C'est le type d'essai fréquemment utilisé pour étudier le comportement mécanique du collage entre deux couches d'enrobés bitumineux. L'essai de cisaillement direct vise à générer directement des contraintes de cisaillement à l'interface de deux couches de matériaux (Figure III-7). Plusieurs dispositifs d'essais ont été développés sur la base de ce principe.

Dès 1979, Leutner a proposé un dispositif d'essai du style « guillotine », idée également reprise par Romanoschi, Mohammad et al., pour déterminer, sous chargement monotone, la résistance au cisaillement de l'interface entre deux couches d'enrobés. Sur la base de ce style « guillotine », les suisses ont développé un dispositif d'essai (LPDS : Layer-Parallel Direct Shear) (Figure III-7). Ce type d'essai fait intervenir des éprouvettes cylindriques bimatériaux de diamètre 150 mm qui peuvent être carottées sur chantier, ou fabriquées en laboratoire. Sur une presse mono axe, deux mâchoires espacées de 4 à 5 mm, et positionnées de part et d'autre de l'interface permettent de générer la sollicitation de cisaillement direct. Cependant on note que ce type d'essai peut générer de la flexion sur la tige du vérin de la presse.

Partant du principe de l'essai de cisaillement direct, l'Université d'Ancône, a proposé une boîte de cisaillement (ASTRA : Ancona Shear Testing Research and Analysis), type boîte de Casagrande, pour étudier en laboratoire le comportement mécanique de l'interface entre deux couches d'enrobés. Outre la sollicitation monotone de cisaillement, ce dispositif d'essai permet d'appliquer et de contrôler l'effort normal à l'interface (Figure III-7). L'éprouvette testée peut être prismatique avec une section cisailée de 100 x 100 mm².

Du côté des Pays-Bas, l'Université de DELFT a développé son propre appareillage pour étudier la performance et l'engrènement de l'interface entre deux couches d'enrobés bitumineux.

L'éprouvette utilisée a une forme prismatique de dimensions 10 x 125 x 450 [mm³] qui peut être prélevée sur chantier ou fabriquée en laboratoire. Le dispositif présente deux vérins hydrauliques disposés verticalement et horizontalement et qui permettent d'appliquer simultanément, si souhaité, un effort de cisaillement (11/15°) de l'effort vertical total et un effort normal à l'interface. Ce dispositif permet d'étudier le comportement en fatigue du collage de l'interface.

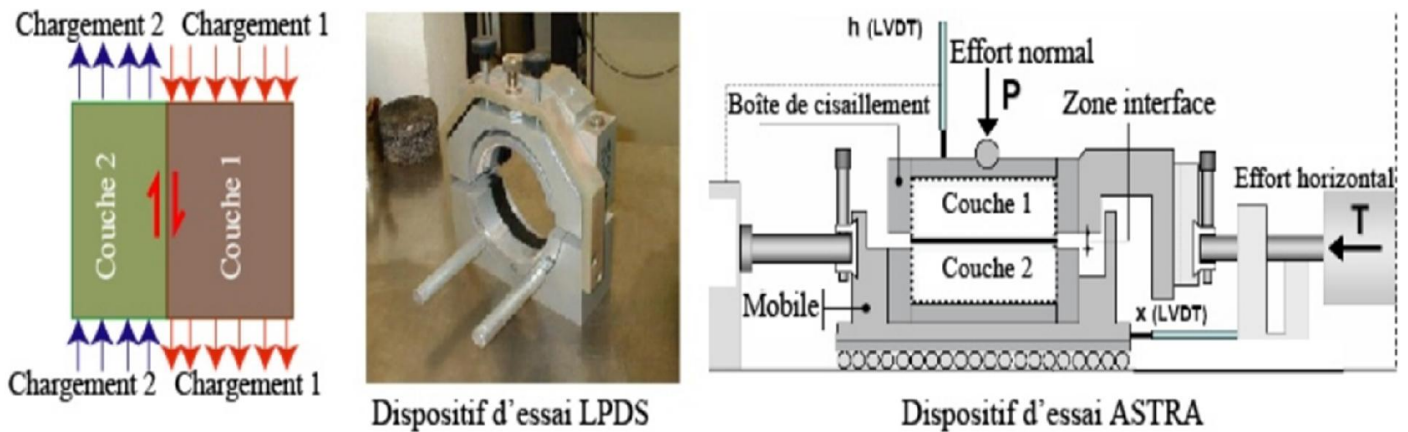


Figure III-7: Essai de cisaillement direct : principe et exemples de dispositifs d'essai

III.2.2.5. L'essai de double cisaillement

Afin de réduire les risques de flexion qui peuvent résulter de la pratique de l'essai de cisaillement direct sur une éprouvette bimatériau, le principe de l'essai de double cisaillement a été adopté. Celui-ci est une version symétrisée du principe de l'essai de cisaillement direct en termes de géométrie et de sollicitation. L'essai se réalise sur une éprouvette monocouche pré-entaillée.

Ce principe d'essai permet de caractériser le comportement en cisaillement du matériau, et, à titre d'application, d'étudier le phénomène de propagation des fissures dans les enrobés vis-à-vis de la caractérisation du comportement en cisaillement des interfaces.

L'essai s'applique sur une éprouvette composée de trois couches, deux à deux collées ou non par une couche d'accrochage. En laboratoire, les deux couches latérales de l'éprouvette sont maintenues fixes tout au long de l'essai, et la couche centrale est soumise à un chargement monotone ou dynamique. Avec la version actuelle du dispositif d'essai (Figure III-8), on suppose solliciter l'interface en cisaillement pur.

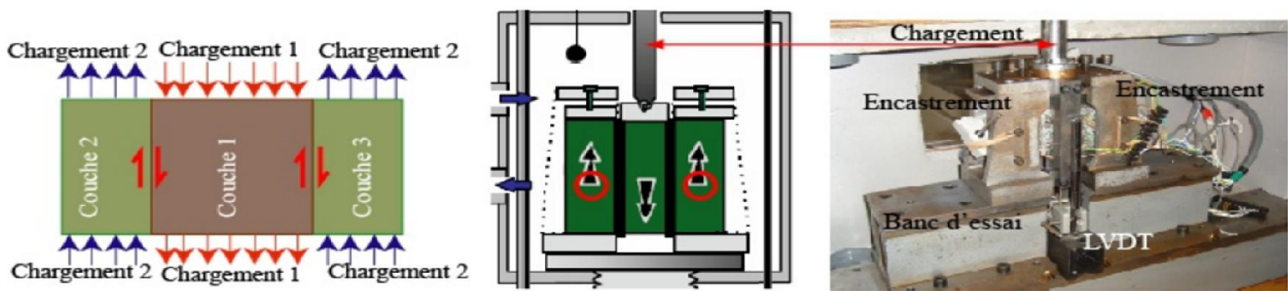


Figure III-8: Essai de double cisaillement : principe et exemple de dispositif d'essai

III.3. Facteurs influençant la performance mécanique de l'interface

Dans le cas général où l'interface entre deux couches d'enrobés est sollicitée simultanément par un effort normal constant et un effort de cisaillement, la résistance au cisaillement de l'interface peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\tau^{\max} = \tau_{\text{frot}} + \tau_{\text{dil}} + \tau_{\text{coh}} + \tau_{\text{ca}}$$

Avec :

- τ_{frot} : contrainte de cisaillement due au frottement à l'interface.
- τ_{dil} : contrainte de cisaillement due à la dilatation à l'interface.
- τ_{coh} : contrainte de cisaillement due à la cohésion interne des couches d'enrobés.
- τ_{ca} : contrainte de cisaillement apportée par la couche d'accrochage.

De cette décomposition, on peut s'attendre à un effet des différents paramètres de l'essai sur la performance mécanique du collage à l'interface. L'interface sans émulsion devrait conduire à une résistance au cisaillement inférieure à celle d'une interface avec émulsion.

III.3.1. Effet de la rugosité de l'interface

L'effet de la rugosité de l'interface a également été abordé à travers des essais monotones de cisaillement. Les travaux conduits par Weston et al. montrent, qu'à 10, 25 et 60°C, et pour un même dosage en émulsion, le collage de deux couches d'enrobés 0/4,75 mm (granulométrie 0/4,75 mm) est plus performant que celui entre deux couches d'enrobés 0/19 mm (Figure III-9). Cependant cette différence tend à s'atténuer avec l'augmentation de la température. Même s'il est évident qu'un enrobé 0/19 mm présente une surface plus rugueuse que l'enrobé 0/4,75 mm, ce dernier génère plus de surface de contact à l'interface des couches d'enrobés, et donc conduirait à une part plus importante de la contrainte de cisaillement due au frottement (τ_{frot}). De plus, en terme de pourcentage de vides, l'enrobé 0/4,75 est généralement plus dense que l'enrobé 0/19, et donc, une part de contrainte au cisaillement due à la cohésion interne des couches d'enrobés plus grande dans le cas de la granulométrie 0/4,75 mm. Pour deux types de granulométrie différents, on devra probablement trouver des dosages optimaux en couche d'accrochage différents.

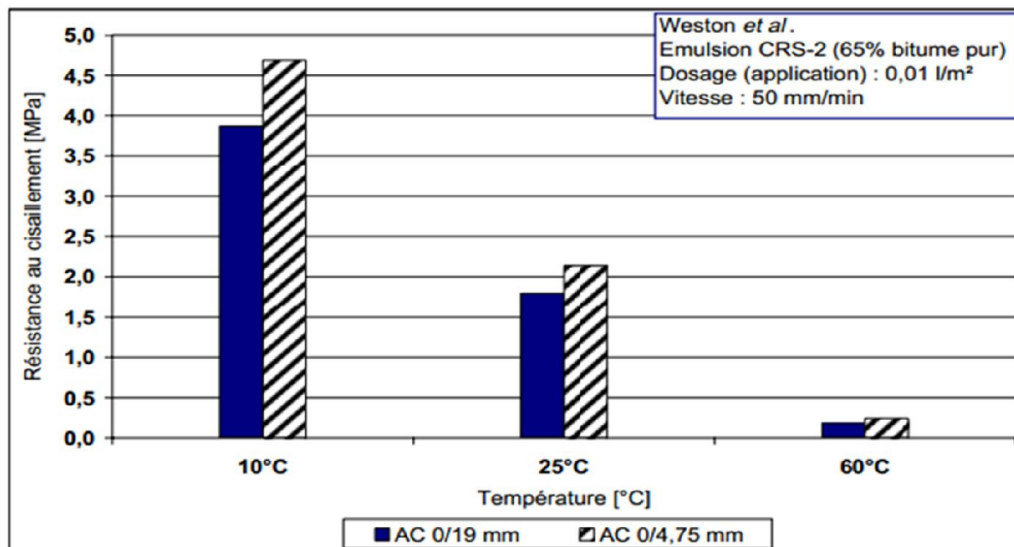


Figure III-9: Effet de la rugosité de l'interface sur la performance du collage

III.3.2. Effet du dosage en couche d'accrochage

L'effet du dosage (taux d'application) en couche d'accrochage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et les résultats conduisent aux mêmes conclusions. Pour une combinaison de matériaux testée en cisaillement monotone à une température donnée, il existe un dosage optimal qui conduit à une valeur maximale de résistance au cisaillement. A titre d'exemple, on présente les résultats de deux campagnes d'essais (Figure III-10). On remarque, qu'aux températures 0 et 25°C, l'excès de couche d'accrochage (par rapport au dosage optimum) conduit à une baisse de la résistance au cisaillement. Ceci pourrait être expliqué par la présence

d'un film épais glissant et qui réduirait la surface de contact entre les granulats à l'interface, et donc, la part de contrainte de cisaillement apportée par le frottement (τ_{frot}). On remarque également, qu'à 55°C, le dosage a peu d'influence sur la performance mécanique du collage.

Des études aussi montrent qu'à 25°C, l'interface sans couche d'accrochage est moins performante que l'interface avec couche d'accrochage.

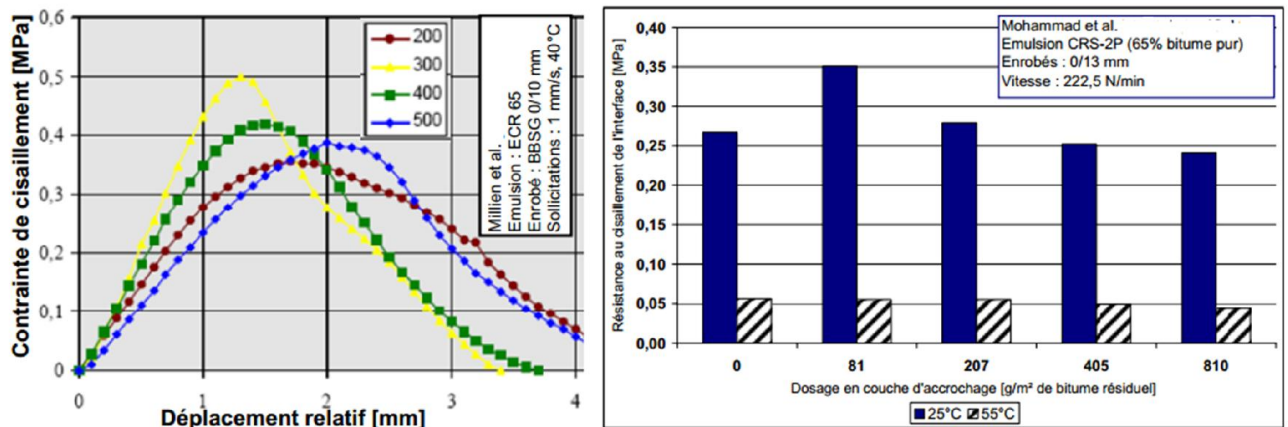


Figure III-10: Effet du dosage en émulsion sur la performance mécanique du collage à l'interface

Le dosage en couche d'accrochage présente alors un effet considérable sur l'efficacité du collage de l'interface. Elle dépend aussi de la sollicitation thermique.

III.3.3. Effet de la contrainte normale à l'interface

Dans la structure de chaussée, l'interface est sollicitée par un effort normal et un effort de cisaillement. Même si les pathologies de dégradation d'interface sont le plus souvent rencontrées sur des portions de chaussée fortement sollicitées en cisaillement, les zones courantes peuvent présenter des niveaux de contraintes normales non négligeables devant celles de cisaillement.

L'application de la contrainte normale vise alors à reproduire des modes de sollicitation proches de la réalité. Les résultats des essais réalisés par Weston et al. montrent, qu'à 10 et 25°C, la résistance au cisaillement de l'interface reste peu sensible à l'application d'une contrainte normale.

Cependant, à 60°C, la résistance au cisaillement est doublée lorsque la contrainte normale appliquée passe de 0 (sans contrainte normale) à 0,069 MPa. On aboutit aux mêmes conclusions en analysant les résultats d'essais réalisés par Mohammad et al.. Des travaux de Mohammad, on remarque, que pour des niveaux de contrainte normale non nuls, la résistance au cisaillement de l'interface évolue de la même manière à 25 et 55°C.

Le film de bitume apporté par la couche d'accrochage est plus déformable à 60°C qu'à 10°C. De ce fait, à 10°C, l'application d'une contrainte normale n'augmente que très légèrement la surface de contact entre les granulats à l'interface, et donc augmente de très peu la part de contrainte de cisaillement apportée par le frottement (τ_{frot}). A 60°C, l'action du frottement est prédominante sur l'adhésion apportée par la couche d'accrochage.

CHAPITRE IV :
EVALUATION DE L'AGRESSIVITE
DU POIDS LOURDS DANS LES
CARREFOURS GIRATOIRES

Chapitre IV. Evaluation de l'agressivité du poids lourds dans les carrefours giratoires

IV.1. Introduction

Les charges réelles qui s'appliquent sur la chaussée en giratoire sont supérieures aux charges limites réglementaires. Elles sont dues aux effets dynamiques qui apparaissent lorsque le véhicule est en mouvement. Sous l'action des efforts appliqués par le véhicule (charges, couple de freinage, envirage, etc.), le pneu se déforme, et établit avec le revêtement une aire de contact. Les déformations engendrées et les propriétés d'adhérence de l'aire de contact entraînent des forces de réaction qui influent sur le comportement du véhicule.

Le but dans ce chapitre est de déterminer le coefficient d'agressivité du poids lourds dans une section courbe ou dans un giratoire.

IV.2. Stabilité d'un poids lourd dans un giratoire

On reprend le calcul de stabilité dans le giratoire (Chapitre II), qui permet aussi la vérification de la dissymétrie de la charge d'essieu dans le giratoire.

- $P2 = 1/2 \cdot (P - Fd) + (hG)/x \cdot (F + Pd)$
- $P1 = 1/2 \cdot (P - Fd) - (hG)/x \cdot (F + Pd)$
- $F1 = K\alpha \cdot P1$
- $F2 = K\alpha \cdot P2$

Pour le calcul opérationnel, seul le demi-essieu le plus chargé est modélisé pour déterminer l'agressivité du jumelage standard dans des carrefours giratoires à rayons de courbures variables.

Dans ce cas d'étude, et vu l'absence d'un outil pour la modélisation des efforts horizontaux ($F2$), on s'intéresse seulement à la modélisation de chargement vertical ($P2$) de demi essieu le plus chargé à l'aide de logiciel ALIZE-LCPC.

IV.3. Présentation des structures de chaussée étudiées

Le catalogue des structures types de chaussées neuves propose un recueil de structures de chaussée pré dimensionnées (matériaux et épaisseurs des couches) en fonction de la classe de trafic poids lourds, de la classe de portance du sol support

On choisit pour l'étude trois structures différentes du catalogue algérien :

- 6BB/14GB/30GNT/S1/TPL5
- 6BB/15GB/35GNT/S2/TPL4
- 8BB/12GB/13GB/S2/TPL6

Les caractéristiques mécaniques et géométriques des structures de chaussée sélectionnées sont données dans le tableau

Tableau IV-1: Caractéristiques géométriques et mécaniques de la structure de chaussée S1/TPL5

Référence	Désignation	Matériau	Epaisseur	E (20°,10Hz)	ν
Fiche n°2 Fascicule 3 (CTTP, 2001)	Couche de surface	BB	6 cm	4000 MPa	0,35
	Couche de base	GB	14 cm	7000 MPa	0,35
	Couche de fondation	GNT	15 cm	350 MPa	0,25
		GNT	15 cm	312 MPa	0.25

Tableau IV-2: Caractéristiques géométriques et mécaniques de la structure de chaussée S2/TPL4

Référence	Désignation	Matériau	Epaisseur	E (20°,10Hz)	ν
Fiche n° 2 Fascicule 3 (CTTP, 2001)	Couche de surface	BB	6 cm	4000 MPa	0,35
	Couche de base	GB	15 cm	7000 MPa	0,35
	Couche de fondation	GNT	15 cm	312 MPa	0,25
		GNT	20 cm	125 MPa	0.25

Tableau IV-3 Caractéristiques géométriques et mécaniques de la structure de chaussée S2/TPL6

Référence	Désignation	Matériau	Epaisseur	E (20°,10Hz)	ν
Fiche n° 1 Fascicule 3 (CTTP, 2001)	Couche de surface	BB	6 cm	4000 MPa	0,35
	Couche de base	GB	12 cm	7000 MPa	0,35
	Couche de fondation	GB	13 cm	7000 MPa	0,35

Tableau IV-4: Caractéristiques mécaniques du sol support pour les trois structures

Désignation de la structure	Plate-forme support de chaussée			Trafic lourds équivalent TPL
	Classe de portance	E	v	
GB/GNT/S2/TPL4	S2	50 MPa	0.35	[300, 600]
GB/GNT/S1/TPL5	S1	125 MPa	0.35	[600, 1500]
GB/GB/S2/TPL6	S2	50 MPa	0.35	[1500,3000]

IV.4. Etude d'une section courante de la chaussée

IV.4.1. Dimensionnement par la méthode classique

Dans cette étape de calcul, on procède au dimensionnement des structures bitumineuses sélectionnées en suivant la méthode classique. On se limite à la vérification de la tenue à la fatigue sous l'effet de l'essieu standard supposé dans une position symétrique.

Dans le cas de ces structures, le critère dimensionnant est la déformation horizontale de type allongement. En effet, c'est cette déformation horizontale qui peut provoquer la rupture en fatigue par flexion des couches d'enrobé. Ainsi, on ne s'intéressera pas aux valeurs de déformation verticale au toit de la couche de sol.

Le dimensionnement vise à déterminer le nombre d'essieux équivalents TCE_i que peut supporter la structure de chaussée. Ce nombre d'essieux peut être converti en nombre de poids lourds en le multipliant par le coefficient d'agressivité noté A.

IV.4.2. Hypothèses de calcul

Vis-à-vis du dimensionnement de la structure, le nombre d'essieux équivalents est calculé en faisant l'hypothèse que les caractéristiques mécaniques des couches de matériau restent constantes pendant la durée de vie de la chaussée. On suppose également que ces couches sont sollicitées par la même amplitude de déformation horizontale, le chargement induit par la roue est modélisé par une pression verticale de 0,662 MPa uniformément répartie sur un disque de rayon 125 mm.

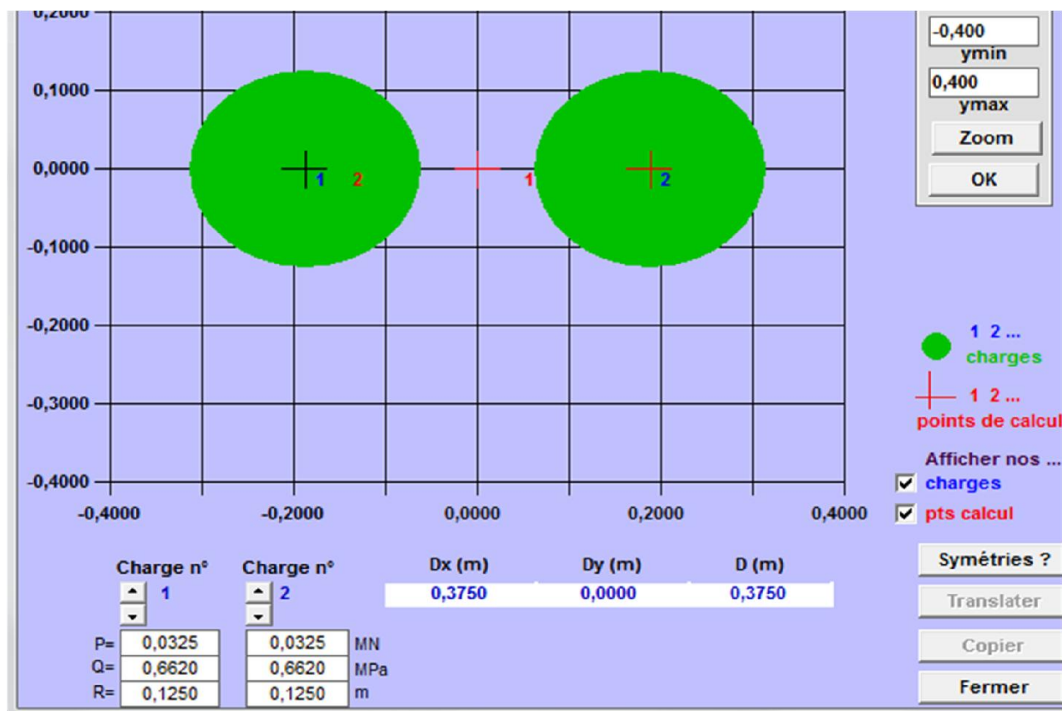


Figure IV-1: Charge de référence : essieu 13 tonnes

IV.4.3. Résultat de simulation en section courante à l'aide d'ALIZE-LCPC

Afin de définir le profil de déformation horizontale, sur laquelle on se basera pour vérifier la tenue à la fatigue par flexion des couches d'enrobé, on présente les valeurs de ϵ_T extraites à la base de la couche traitée au liant carbonaté des structures étudiées.

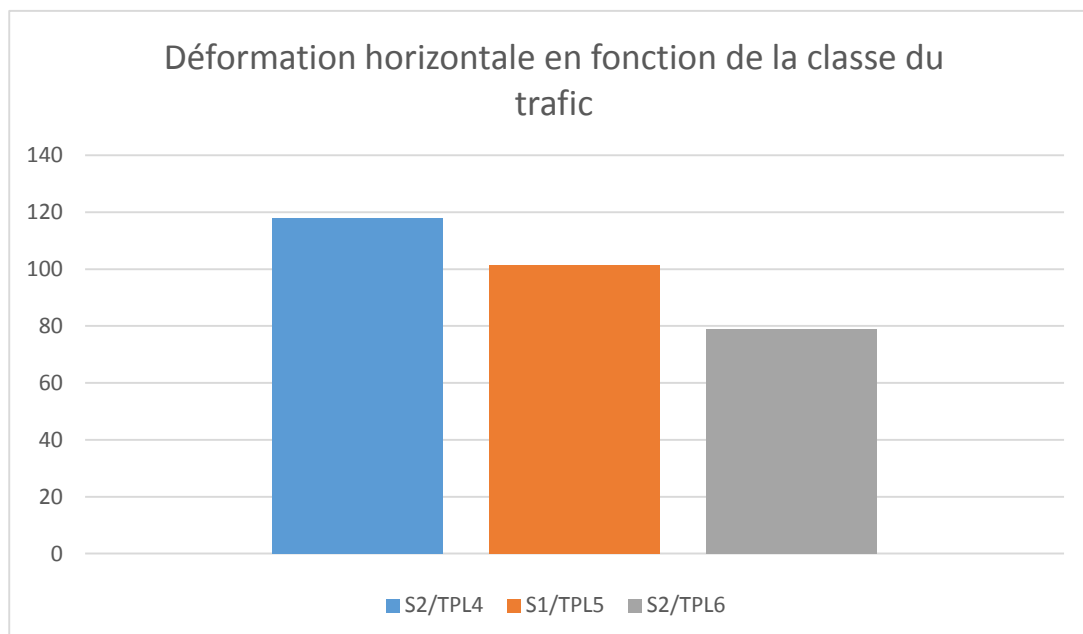


Figure IV-2: Déformation horizontale (de traction) en section courante

On remarque que la déformation de traction est plus petite lorsqu' on augmente le trafic poids lourd ; c'est-à-dire le nombre de répétition de l'essieu standard (c'est le principe de la fatigue)

IV.5. Dimensionnement en tenant compte de la dissymétrie de l'essieu

Dans cette étape de calcul, on se propose de dimensionner les structures de chaussée étudiées en modifiant la charge de demi-essieu modélisé en fonction de rayon de giratoire et la vitesse

Les hypothèses suivantes ont été considérées :

- Trois vitesses et trois rayons du giratoire sont considérés
- $d = \tan \delta : 2,5\%$
- $M : 13000 \text{ kg}$
- $x : 2,05 \text{ m}$
- $hG : 2 \text{ m}$.

Le tableau suivant présente un récapitulatif des intensités des charges critiques induites par le trafic sur chacune des deux roues (du jumelage) du demi-essieu le plus chargé.

Tableau IV-5: Contraintes verticales du jumelage en fonction de la vitesse et le rayon de giratoire

Charges Critiques Par roue	Section de chaussée sur giratoire								
	Vitesse de 20 km/h			Vitesse de 25 km/h			Vitesse de 30 km/h		
	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m
P2 (kN)	41.81	43.75	46.97	46.16	49.18	54.21	51.47	55.82	63.07
Contrainte (MPa)	0.426	0.446	0.479	0.470	0.501	0.552	0.525	0.569	0.643
Dissymétrie (%)	64.35	67.37	72.36	71	75.68	83.38	79.31	85.95	97.13

A partir des résultats obtenus, on remarque que :

- La contrainte verticale augmente avec l'augmentation de la vitesse et la diminution du rayon.
- Le rapport de la dissymétrie est proche de 100% avec un rayon de 15 m et une vitesse de 30 km/h.

La simulation de ces résultats avec ALIZE-LCPC nous oblige à définir à chaque fois un jumelage lié à la vitesse et rayon de giratoire, la figure suivante nous montre l'exemple de chargement avec une vitesse de 20 km/h et un rayon de 25 m

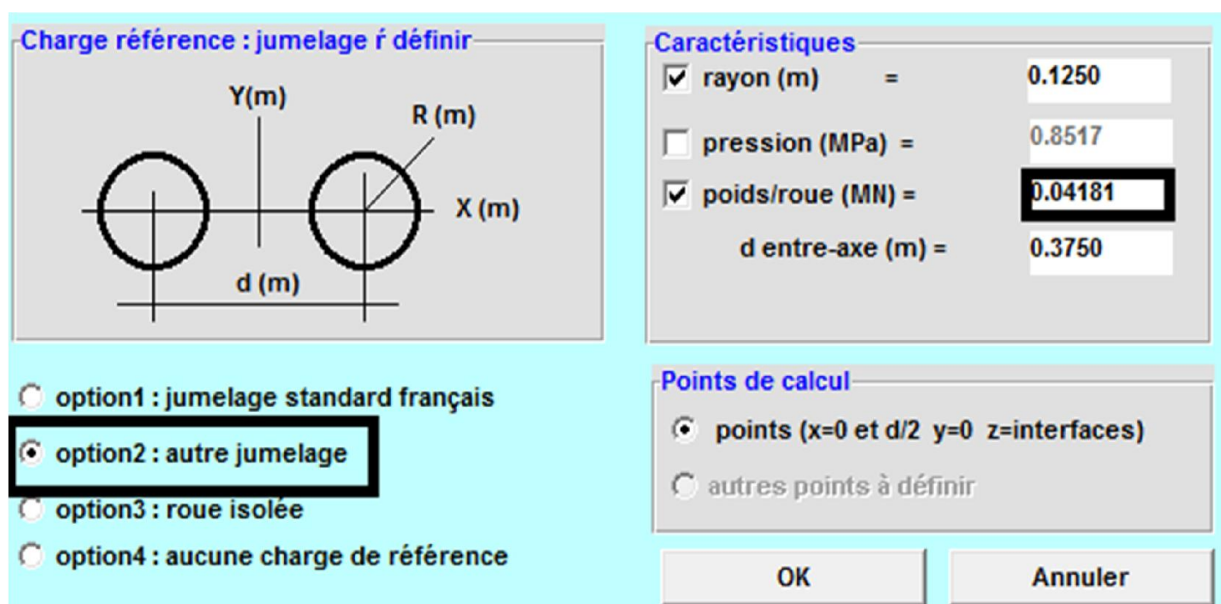


Figure IV-3: Chargement lié à la vitesse et au rayon de giratoire

IV.5.1. Résultats de la simulation

Sous l'effet du chargement (jumelage de l'essieu), l'analyse de la réponse structurelle de la chaussée est particulièrement axée sur l'interprétation des profils de déformation horizontale à la base de chaque couche de matériau.

Tableau IV-6: résultats de la simulation de la structure de chaussée S2/TPL4

Charges Critiques Par roue	Section de chaussée sur giratoire								
	Vitesse de 20 km/h			Vitesse de 25 km/h			Vitesse de 30 km/h		
	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m
P2 (kN)	41.81	43.75	46.97	46.16	49.18	54.21	51.47	55.82	63.07
Contrainte de traction à la base de GB (MPa)	-0.426	-0.446	-0.479	-0.47	-0.501	-0.552	-0.525	-0.569	-0.643
Déformation de traction à la base de GB (10 ⁻⁶)	-151.7	-158.8	-170.5	-167.5	-178.5	-196.8	-186.8	-202.6	-228.9

Tableau IV-7: Résultats de la simulation de la structure de chaussée S1/TPL5

Charges Critiques Par roue	Section de chaussée sur giratoire								
	Vitesse de 20 km/h			Vitesse de 25 km/h			Vitesse de 30 km/h		
	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m
P2 (kN)	41.81	43.75	46.97	46.16	49.18	54.21	51.47	55.82	63.07
Contrainte de traction à la base de GB (MPa)	-0.426	-0.446	-0.479	-0.47	-0.501	-0.552	-0.525	-0.569	-0.643
Déformation de traction à la base de GB (10^{-6})	-130.4	-136.4	-146.5	-143.9	-153.4	-169	-160.5	-174.1	-196.7

Tableau IV-8: Résultats de la simulation numérique de la structure de chaussée S2/TPL6

Charges Critiques Par roue	Section de chaussée sur giratoire								
	Vitesse de 20 km/h			Vitesse de 25 km/h			Vitesse de 30 km/h		
	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m
P2 (kN)	41.81	43.75	46.97	46.16	49.18	54.21	51.47	55.82	63.07
Contrainte de traction à la base de GB (MPa)	-0.426	-0.446	-0.479	-0.47	-0.501	-0.552	-0.525	-0.569	-0.643
Déformation de traction à la base de GB (10^{-6})	-101.5	-106.3	-114.1	-112.1	-119.5	-131.7	-125	-135.6	-153.2

Les résultats de la simulation montrent l'effet de la dissymétrie de l'essieu sur la réponse mécanique de chaque structure ;on voit que les déformations enregistrées sont tous supérieur à la déformation enregistrée en section courante.

IV.5.2. Coefficients d'agressivité

L'endommagement relatif causé par le jumelage standard sur les giratoires par rapport à celui causé sur une section de chaussée courante est évalué dans cette partie. La quantification de l'endommagement relatif qui est aussi appelé coefficient d'agressivité se fait dans des carrefours giratoires , à partir des relations ci-après :

$$\epsilon_t, adm = \epsilon_6 (10^\circ c, 25Hz). K_{ne}. K_\theta. K_r. K_c$$

- $\epsilon_6 (10^\circ c, 25Hz)$: déformation limite détenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de rupture de 50% à $10^\circ C$ et 25Hz (essai de fatigue).
- K_θ : facteur lie à la température.
$$K_\theta = \sqrt{\frac{E(10^\circ C)}{E(\theta_{eq})}}$$
- K_{ne} : facteur lié au nombre cumulé d'essieux équivalents supporté par la chaussée.
 - $K_{ne} = (TCEi / 10^6)^b$
- K_r : facteur lié au risque et aux dispersions.
$$K_r = 10^{-tb\delta}$$
- K_c : facteur lié au calage des résultats du modèle de calcul avec le comportement absorbé sur la chaussée.
- b : pente de la droite de fatigue ($b < 0$)
- $E (10^\circ c)$: module complexe du matériau bitumineux à $10^\circ C$.
- $E (\theta_{eq})$: module complexe du matériau bitumineux à la température équivalente qui est fonction de la zone climatique considérée.
- δ : La dispersion
$$\delta = \sqrt{SN^2 + \left(\frac{c}{b} Sh\right)^2}$$
- SN : dispersion sur la loi de fatigue.
- Sh : dispersion sur les épaisseurs.
- c : coefficient égal à **0.02**
- t : fractile de la loi normale qui est en fonction du risque adopté (r %).

A partir de cette relation, on peut tirer le nombre d'essieux équivalent en giratoire en fonction de la vitesse et le rayon, et aussi le coefficient d'agressivité.

$$TCEi_{gir} = \left(\frac{\epsilon_{gir}}{\epsilon_6 * K_\theta * K_r * K_c} \right)^{(-1 / 0.146)} * 10^{-6}$$

$$TCEi_{cour} = TCEi_{gir} * A_{gir}$$

- $TCEi_{gir}$: Trafic équivalent en section de giratoire
- $TCEi_{cour}$: trafic équivalent en section courante
- A_{gir} : coefficient d'agressivité en section giratoire

Tableau IV-9: valeurs du trafic équivalent et coefficients d'agressivité en fonction de la vitesse et le rayon du giratoire de la structure de chaussée S2/TPL4

Charges Critiques Par roue	Section Courante	Section de chaussée sur giratoire								
		Vitesse de 20 km/h			Vitesse de 25 km/h			Vitesse de 30 km/h		
		R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m
P2 (kN)	32.5	41.81	43.75	46.97	46.16	49.18	54.21	51.47	55.82	63.07
Trafic équivalent (10 ⁴)	294	48.9	35.7	21.9	24.8	16.04	8.22	11.7	6.7	2.9
Coefficient d'agressivité		6	8	13	12	18	35	25	43	100

Tableau IV-10: valeurs du trafic équivalent et coefficients d'agressivité en fonction de la vitesse et le rayon du giratoire de la structure de chaussée S1/TPL5

Charges Critiques Par roue	Section courante	Section de chaussée sur giratoire								
		Vitesse de 20 km/h			Vitesse de 25 km/h			Vitesse de 30 km/h		
		R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m
P2 (kN)	32.5	41.81	43.75	46.97	46.16	49.18	54.21	51.47	55.82	63.07
Trafic équivalent (10 ⁴)	522	137.8	101.2	62.08	70.2	45.3	23.3	33.2	19.0	8.25
Coefficient d'agressivité		4	5	8	7	11	22	15	27	63

Chapitre IV : Evaluation de l'agressivité du poids lourds dans les carrefours giratoires

Tableau IV-11: valeurs du trafic équivalent et coefficients d'agressivité en fonction de la vitesse et le rayon du giratoire de la structure de chaussée S2/TPL6

Charges Critiques Par roue	Section courante	Section de chaussée sur giratoire								
		Vitesse de 20 km/h			Vitesse de 25 km/h			Vitesse de 30 km/h		
		R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m	R=25 m	R=20 m	R=15 m
P2 (kN)	32.5	41.81	43.75	46.97	46.16	49.18	54.21	51.47	55.82	63.07
Trafic équivalent (10 ⁴)	1305	766	559	344	388	251	129	184	105	45.7
Coefficient d'agressivité		2	2	4	3	5	10	17	12	28

La vitesse du véhicule a un effet sur la durée de vie d'une chaussée comme on a vu dans le dernier chapitre ; plus la vitesse est grande, on aura un coefficient d'agressivité plus grand.

On a aussi l'influence du rayon de giratoire (ou section courbe) sur l'agressivité du poids lourds ; lorsqu'on diminue les rayons, on se trouve avec un coefficient d'agressivité plus grand.

Ces coefficients d'agressivité permettent, d'offrir des solutions techniques de conception et de dimensionnement des structures de chaussée situées dans un carrefour giratoire. Ces solutions consistent à déterminer les épaisseurs des couches de chaussées équivalentes à une structure de chaussée en section courante, pour que les dégradations qui surviendront à ces endroits ne mettent pas en péril la pérennité de la structure.

IV.6. Conclusion

Cette étude montre la vulnérabilité des sections de chaussées soumises d'une part aux chargements multi-essieux et d'autre part aux sollicitations tangentielles répétées avec la dissymétrie des charges à l'essieu dans des carrefours giratoires.

Les expressions permettant de déterminer le coefficient d'agressivité du jumelage standard français dans un carrefour giratoire ont été formulées, fonctions du rayon du giratoire R(m), de la vitesse moyenne V (km/h) et de la structure de chaussée. Ces résultats seront exploités par des gestionnaires routiers et des bureaux d'études techniques spécialisés en vue du dimensionnement réel des chaussées soumises à ces divers chargements.

CONCLUSION GÉNÉRALE

ENS 2015

Conclusion générale

Ce travail s'est appuyé sur les recherches récentes visant une amélioration de la prise en compte des effets des chargements réels sur l'endommagement par fatigue des chaussées bitumineuses avec une partie de la recherche bibliographique et une partie de modélisation numérique.

Le travail aboutit à la détermination des agressivités de poids lourds sur des structures de chaussée bitumineuses routières.

La vitesse du véhicule a un effet sur la durée de vie d'une chaussée comme on a vu dans le dernier chapitre ; pour une vitesse grande, on aura un coefficient d'agressivité plus grand.

On a aussi l'influence du rayon de giratoire (ou section courbe) sur l'agressivité du poids lourds ; lorsqu'on diminue les rayons, on se retrouve avec un coefficient d'agressivité plus grand.

Pour la structure de chaussée S2/TPL6, on a trouvé les coefficients d'agressivité les plus petits ; cela est justifié par l'empilement des couches de chaussée épaisses traitées au liant carbonaté.

Le type d'interface reste toujours un facteur très important pour le dimensionnement des chaussées comme on a vu dans le deuxième chapitre.

Le travail fait reste toujours incomplet à cause du manque d'outils pour la modélisation du chargement horizontal (cisaillement) et la modélisation des interfaces entre couche traitée pour voir son influence sur le comportement de la structure bitumineuse.

Bibliographie

BAAJ H : Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés - Institut national des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, 2002.

BENSMINE D : Le comportement élasto-plastique des interfaces cas des chaussées Modélisation d'un essai de double cisaillement- Université EL HEDJ LAKHDAR de Batna, Batna,Algérie 2011.

BERTHIER Jean : Véhicules et routes, Techniques de l'Ingénieur.1991

CTTP : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves,Fascicule 1,2,3 - Alger , 2001.

DIAKHATE Malick : Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée , Université de Limoges, 2007.

KOBISH R : Réalisation des couches d'accrochage, contrôle, auscultation , Journées techniques Routes - Nantes ,France, 2004.

LCPC SETRA : Conception et dimensionnement des structures de chaussées, guide technique. - Paris,France , 1994.

LCTP : Ovalisation : Exécution et exploitation des mesures , Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, méthode d'essai LPC N° 41 - Paris ,LCTP, 1995.

Miner A : Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics , 1945.

NGARGUEUEDJIM Kimtanga Contribution à l'étude des lois d'endommagement en fatigue - Lyon : Institut national des Sciences Appliquées, 2003.

Petit C Diakhaté M, Millien A ,Phelipot-Mardele A ,Pouteau B Pavement Design for Curved Road Sections: Fatigue Performance of Interfaces and Longitudinal Top-down Cracking in Multilayered Pavements , Edition Hermes, 2009.

RAAB C. PARTL M. N Interlayer shear performance : experience with different pavement structures - Vienna : 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2004.

SETRA/DCT Le décollement des couches de revêtement des chaussées - France : SETRA, 1986.

Zoa Ambassa Vers la modélisation du comportement à la fatigue des chaussées bitumineuses routières sous chargement réel , UNIVERSITÉ DE LIMOGES, 2013.

